

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Řešení kompenzace
LDS (lokální distribuční soustavy)
v podmínkách omezené výroby.
Design of Local Distribution Network Compensation

Poděkování:

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Doc. Dr. Ing. J. Gureckému za odborný dohled a cenné rady, které mi byly během zpracování této diplomové práce poskytnuty.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Ostrava 7. května 2010

.....
Tomáš Hrabina

Abstrakt

Tato práce řeší problematiku kompenzace jalových výkonů a filtraci vyšších harmonických. V teoretické části je popsáno proč se kompenzuje, důsledky špatného účinníku, typy kompenzačních prostředků, kde vznikají harmonické vyšších řádů a několik řešení pro potlačení vyšších harmonických v síti.

Dále je řešena lokální distribuční soustava z hlediska kvality elektrické energie, rozložení spotřebičů a zdrojů pro kompenzaci. Jsou zde zahrnuty také výpočty při různých úrovních odběru z distribuční soustavy a možnosti dalšího řešení a doporučení nutných opatření.

This work smoothing - out problems idle power compensation and filtration highers harmonic. In theoretic parts be described to why compensates, incidence bad power factor, print compensatory agents, where rise higher-order harmonics plus several solving for suppression highers harmonic in power grid.

Further is buckthorn local distributive system in light of qualities seat power control energy, lay appliances and sources for contractual netting. There are included also calculations at different levels delivery issued from distributive system plus possibilities next solving plus recommendation necessary procuration.

Klíčová slova

Kompenzace jalového výkonu, filtrace vyšších harmonických

Keywords

Idle power compensation, filtration highers harmonic

Obsah

Abstrakt	1
Klíčová slova	1
Obsah	2
1 Úvod	3
2 Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu	4
2.1 Úvod do kompenzace	4
2.2 Spotřebiče jalového výkonu	5
2.3 Důsledky odběru výkonu se špatným účínkem	7
2.4 Základní rozdělení technických prostředků pro kompenzaci	8
2.5 Způsoby řízení kompenzačního výkonu	20
2.5.1 Stupňovité řízené kompenzátory	20
2.5.2 Plynule řízené - pasivní	21
2.5.3 Plynule řízené – aktivní	23
2.6 Zásady pro návrh kompenzačního prostředku	25
2.7 Stanovení výkonu kompenzačního zařízení	26
2.8 Vliv kompenzačních zařízení na napájecí síť	28
2.8.1 Rezonanční jevy	28
2.8.2 Přechodné děje při spínání a vypínání kondenzátorů	29
2.8.3 Samobuzení	29
2.8.4 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)	30
3 Vliv a filtrování harmonických	33
4 Rozbor stávajícího stavu v BC-MCHZ	35
4.1 Rozložení zdrojů kompenzace	35
4.2 Měření odběru LDS při chodu synchronních strojů	35
4.3 Měření spotřebičů síťovým analyzátozem	38
4.3.1 Vlastní měření	38
4.3.2 Výpočet kompenzace měřených spotřebičů	45
5 Kapacita kabelových vedení	50
5.1 Řešení kapacity kabelového vedení v LDS	50
6 Závěrečné zhodnocení	52
7 Seznam použité literatury	53
8 Přílohy	54

1 Úvod

V této diplomové práci jsem teoreticky popsal kompenzaci jalového výkonu a v případech, kde dochází ke vzniku harmonických vlivem elektronických systému v rozvodech, je zde uveden také rozbor filtrace harmonických. Dodávka jalové složky výkonu nebo vznik harmonických v sítích jsou nežádoucí, protože mají velký vliv na kvalitu elektrické energie. A také jsou odběratelé finančně penalizováni za nedodržení těchto parametrů v určitých mezích stanovených v připojovacích podmínkách pro velké odběratele. V dalších kapitolách je proveden rozbor stávajícího stavu lokální distribuční soustavy a možnosti jejího dalšího řešení do budoucna v případě navyšování výkonu.

2 Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu

2.1 Úvod do kompenzace

Pro provoz některých elektrických zařízení, ať na straně elektrických sítí nebo na straně spotřebičů elektrické energie, je nutné vytvořit elektromagnetické nebo elektrické pole. To se vytváří buď indukčností (motory, transformátory apod.) nebo kapacitou (kondenzátory, elektrody). Na indukčnosti dochází vlivem průchodu proudu k jeho fázovému posunu za napětím, na kapacitě se fázově opoždí napětí za proudem. Chování jednotlivých prvků je možné popsat jejich impedancí, která v sobě zahrnuje nejen složku činnou, ale i složku jalovou.

Jalovou je nazývána z důvodu, že energii do této impedance vloženou nelze zužít, ale přesto se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem. Při tomto přenosu vznikají na prvcích přenosových a distribučních sítí ztráty, které jsou ve formě tepla vyzařovány do okolí. Proto je velmi účelné vkládat do elektrických sítí další zařízení, kterými se jejich charakter (tedy i impedance) změní a ztráty se tím eliminují (kompenzují).

Zanedbáme-li další složky výkonu (deformační, pulzační a skrytý), můžeme definovat účinník odběru jako poměr výkonu činného P a zdánlivého S ,

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (-) \quad (1)$$

kde

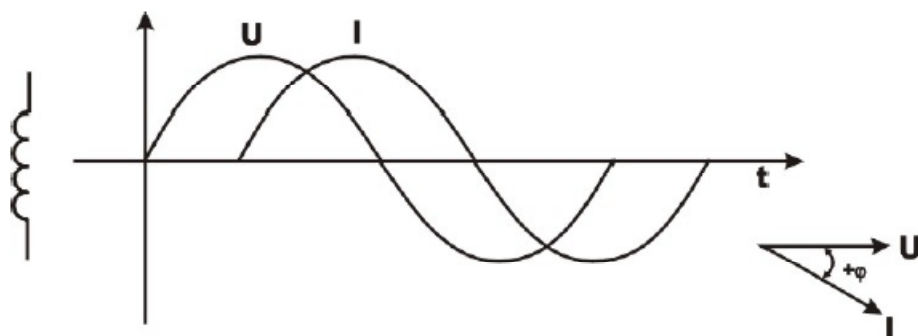
P ...činný výkon a je definován $P=S \cdot \cos\varphi$,
 Q ...jalový výkon a je definován $Q=S \cdot \sin\varphi$.

Účinník je bezrozměrný a jeho hodnota se pohybuje od nuly do jedné, přičemž jednotkový účinník znamená, že celý výkon je činný (fázový posuv je nulový), nulový účinník znamená, že celý výkon je jalový, zátěž je čistě kapacitní nebo čistě indukční a fázový posuv je tedy $\pm 90^\circ$. Nízké hodnoty účinníku znamenají vyšší ztráty energie. Pokud obvod obsahuje také součástky nesinusového charakteru (obsahuje harmonické), je třeba vedle jalového výkonu uvažovat i tzv. deformační výkon. Tento způsobí další snížení činného výkonu oproti zdánlivému a výsledný účinník se pak někdy pro odlišení nazývá opravdový účinník. Zlepšení hodnoty účinníku, tzn. zmenšení jalového výkonu lze provést správným návrhem a provozováním zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů (správné dimenzování transformátorů, využití synchronních motorů, správné dimenzování asynchronních motorů a omezení jejich hodu naprázdno apod.) nebo použitím kompenzačních zařízení, které jsou zdrojem jalového výkonu.

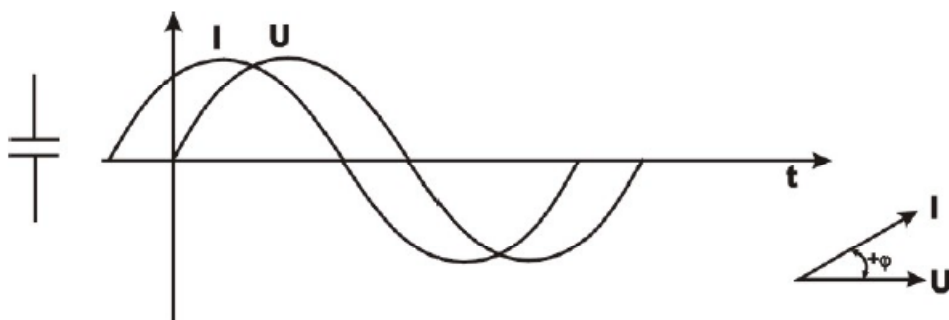
Kompenzací účinníku (PFC - Power Factor Correction) dosáhneme kromě snížení odběru jalové energie také snížení tepelných ztrát v rozvodné soustavě. S kompenzací účinníku je možno v mnoha případech spojit i řešení problémů filtrace harmonických a energetického rušení, symetrizace nebo kolísání napětí (flickr). Kompenzací jalového výkonu pak rozumíme snížení odběru induktivního jalového výkonu pomocí dodatečných technických opatření na předepsanou hodnotu, tj. požadovaný účinník v rozmezí $\cos\varphi = 0,95-1$.

Zde bych rád upozornil na technické a ekonomické důsledky odběru činného výkonu se špatným účinníkem, na možné problémy vznikající při návrhu a provozování kompenzačních zařízení a navrhl možné způsoby řešení této problematiky.

Pozn. – pod pojmem účinník budeme v tomto příspěvku rozumět tzv. klasický účinník (definovaný jako kosinus fázového posunu mezi 1. harmonickou napětí a proudem) a ne tzv. správný účinník λ , který uvažuje i ostatní newattové výkony trojfázové soustavy zatěžované nesouměrně nesinusovými proudy, tj. výkon deformační (způsobený zkreslením proudu harmonickými), výkon pulzační (způsobený zpětnou složkou proudu 1. harmonické) a výkon skrytý (způsobený nulovou složkou proudu 1. harmonické).



obr. 2. 1 Posuv napětí a proudu induktivních spotřebičů



obr. 2. 2 Posuv napětí a proudu kapacitních spotřebičů

2.2 Spotřebiče jalového výkonu

Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou jedním z rozhodujících spotřebičů jalového induktivního výkonu

potřebného k vytvoření točivého magnetického pole statoru a k pokrytí rozptylového magnetického toku. Štítkový údaj účinníku se vztahuje ke jmenovitému zatížení, hodnota závisí na konstrukci motoru (např. kroužkové motory nebo pomaloběžné mají horší účinník oproti motorům s kotvou nakrátko nebo rychloběžným). Podstatné je zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru, zvláště při chodu naprázdno (60-70% příkonu motoru při plném zatížení). Celkový odebíraný jalový výkon Q určíme ze vztahu:

$$Q = Q_0 + Q_z \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right) \cdot 2 \quad (\text{VAr; VAr, VAr, W}) \quad (2)$$

kde

Q_0 ... je jalový výkonu při chodu naprázdno,

Q_z ... je proměnný jalový výkon,

P_n ... je jmenovitý výkon motoru.

Asynchronní generátory

Asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro vytvoření magnetického pole.

Transformátory

Celkový odebíraný jalový výkon Q je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno Q_0 , který je asi 1-3,5% jmenovitého výkonu transformátoru a z proměnného jalového výkonu pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který se zvětšuje se čtvercem zatížení transformátoru a je dán vztahem:

$$Q = Q_0 + u_k \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right) \cdot 2 \cdot S_n \quad (\text{VAr; Var, -, A, VA}) \quad (3)$$

kde

u_k ...napětí nakrátko,

I_n ...jmenovitý proud transformátoru,

S_n ...jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru.

Hodnota účinníku při chodu transformátoru naprázdno je velmi malá, $\cos\phi_0 = 0,1-0,2$, tj. čistě jalové zatížení. Proto se vyžaduje kompenzace jalového proudu naprázdno transformátorů středo- a velkoodběratelů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru.

Při průměrném zatížení 70% se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje 4-6% jmenovitého výkonu transformátoru.

Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece

Tato zařízení jsou jedna z nejproblematictějších z hlediska jejich zpětných vlivů na síť. Kromě odběrů výkonů s nízkými hodnotami účinníku vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu, která způsobuje kolísání napětí (blikání, flicker), generování vyšších harmonických proudů a nesymetrii odběru.

Stabilní hoření a dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účinníkem mezi $\cos\phi_0 = 0,7-0,86$. Symetrizaci odběru jednofázových pecí lze řešit vhodným přidáním tlumivek a kondenzátorů na svorky pece tak, aby tvořily třífázový spotřebič zapojený do trojúhelníku.

Výkonové polovodičové měniče

Jedná se o řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem

(napětiovým nebo proudovým), přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače apod. Různé typy měničů se z hlediska odběru jalového výkonu liší, např. řízený polovodičový usměrňovač pro řízení ss motorů pracuje s účínkem $\cos\varphi = 0,5$ i horším, avšak střídač s neřízeným usměrňovačem na vstupu a ss napětiovým meziobvodem s šířkovou pulzní regulací napětí pro řízení otáček asynchronního motoru může pracovat s účínkem $\cos\varphi = 0,95$ apod. Pro řízený polovodičový usměrňovač pro regulaci ss motorů platí, že účíník se zhoršuje s hloubkou regulace otáček a nepřímo s velikostí ss napětí naprázdno U_{d0} při úhlu řízení tyristorů $\alpha = 0$.

Ostatní spotřebiče jalového výkonu

Jedná se zejména o výbojková a zářivková svítidla, svařovací transformátory navíc s rychle se měnícím odebíraným jalovým výkonem (svařovací lisy, bodovky), reaktory pro omezení zkratových proudů apod.

Venkovní a kabelová vedení

Vedení spotřebují poměrně málo jalové energie, a to vlivem své indukčnosti a kapacity.

U venkovních vedení (pod 200km) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbatelná. U kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity (kapacita roste čím větší je průřez žil). Tato vlastnost kabelových sítí může vést při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních (tj. trvale překompenzovaných) k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích VN.

2.3 Důsledky odběru výkonu se špatným účíníkem

Následkem špatného účíníku je v elektrizační soustavě nutný přenos činného i jalového výkonu (obecně i výkonu deformačního, pulzačního a skrytého), tj. tzv. zdánlivého výkonu, který je větší než potřebný výkon činný.

(Hradílek, 2008)

Tento zdánlivý výkon ve svém důsledku způsobuje:

- a) **zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy**, tj. vedení, transformátory, elektrické rozvodny apod. musí být dimenzovány na velikost zdánlivého proudu, který je $1/\cos\varphi$ krát větší než proud činný,
- b) **snížení využití generátorů** - jalový induktivní proud odběru zeslabuje buzení generátoru a je třeba zvýšit budící proud, tím dochází ke zvětšení tepelných ztrát v rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. Opačná situace vzniká při překompenzování v odlehčené síti, neboť značně odbuzený stroj by mohl vypadnout ze synchronismu a způsobit zvýšení horní přípustné hodnoty napětí; proto je nutné pracovat s induktivním účíníkem $\cos\varphi = 0,95$ až $0,98$,
- c) **zvýšení tepelných ztrát** v ohmických odporech prvků elektrizační soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, tj. rostou s druhou mocninou převrácené hodnoty účíníku (např. při $\cos\varphi = 0,7$ jsou dvakrát větší než při $\cos\varphi = 1$),

- d) **zvětšení úbytku napětí v síti** způsobený zdánlivým proudem I s fázovým posunem φ na impedanci sítě, tj. na činném odporu R a reaktanci X je:

$$\Delta U = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (V; \Omega, A, -, \Omega, A, -) \quad (4)$$

- e) **zhoršení zkratových poměrů v síti** způsobené zvýšením buzení generátorů, tj. dochází ke zvětšení nárazového zkratového proudu a nesymetrické ss složky a v důsledku toho ke zhoršení vypínacích podmínek a namáhání vypínačů,
- f) **nepříznivý vliv na práci v elektrizační soustavě** – zhoršuje se spolupráce mezi elektrárnami při předávání velkých jalových výkonů, zhoršuje se stabilita přenosu elektrické energie, snižuje se účinnost alternátorů, transformátorů a dalších zařízení,
- g) **zvýšení sazby za spotřebovanou elektrickou energii** - zvětšení ztrát v rozvodu můžeme vysvětlit z výrazu pro ztrátový výkon:

$$P_z = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{R}{U^2} \cdot 3 \cdot U^2 \cdot I^2 = \frac{R}{U^2} \cdot S^2 = \frac{R}{U^2} \cdot (P^2 + Q^2) \quad (W; \Omega, A) \quad (5)$$

Uvažujeme-li činnou i jalovou složku proudu, pak

$$I^2 = I_c^2 + I_j^2 = I^2 \cdot \cos^2 \varphi + I^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (A) \quad (6)$$

Ztráty způsobené proudem pak budou

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi + 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (W) \quad (7)$$

Poměr ztrát, způsobených jalovou a činnou složkou proudu, můžeme vyjádřit vztahem

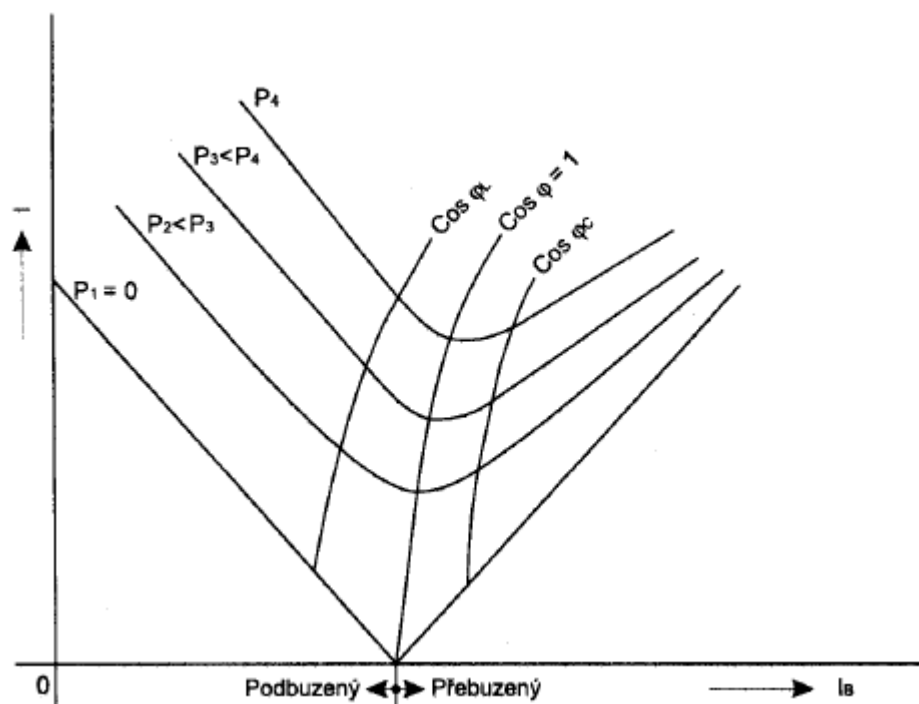
$$\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_P} = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi}{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \tan^2 \varphi \quad (8)$$

2.4 Základní rozdělení technických prostředků pro kompenzaci

a) podle principu činnosti

ROTAČNÍ - synchronní kompenzátory a synchronní motory

Synchronní elektrický stroj se vyznačuje zejména tím, že se mu magnetizační energie dodává samostatným budícím vinutím napájeným ze zdroje stejnosměrného proudu. Synchronní elektromotory se používají tam, kde očekáváme stabilní zátěžný moment, tj. pro pohony čerpadel, kompresorů, ventilátorů a jiné. Změnou velikosti budícího proudu můžeme měnit účinník odběru motoru a to jak v induktivní tak v kapacitní oblasti. Na obr. 10 lze vidět tzv. V-křivky tj. závislost statorového proudu na budícím proudu při stálém výkonu stroje.



obr. 2. 3 V-křivky synchronního stroje

Abychom dosáhli stálého účinníku při různém zatížení je potřeba vhodným způsobem řídit budící proud. Regulátory, které se často osazují synchronními motory, mohou zajistit chod motoru i při změnách činného zatížení buď s konstantním účínkem, nebo konstantním jalovým výkonem. Toho lze velmi účinně využít ke kompenzaci jalového výkonu paralelně připojených spotřebičů. Tyto stroje jsou schopny pracovat s minimálním činným výkonem a relativně velkým rozsahem regulace jalového výkonu a jsou převážně konstruovány pro hladiny vysokého napětí – obvykle pro síť 6 kV.

Velkou nevýhodou u těchto strojů, i při použití moderních regulačních jednotek, je regulace jalového výkonu zatížena jistým zpožděním. A proto je tento způsob kompenzace použit spíše u centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. Připojují se k přípojnícím podružných průmyslových rozvodů 6 kV nebo přes samostatný transformátor k přípojnícím hlavních rozvodů.

Kompenzace jalového výkonu pomocí synchronních strojů je v poslední době v útlumu. Provoz těchto strojů má vliv na spotřebu činné energie, vyššími nároky na obestavěný prostor a jeho vybavenost oproti statickým kompenzačním zařízením.

(NAVARIS.CZ)

STATICKE

(kondenzátor připojený přímo na síť nebo hrazený tlumivkou, kompenzační filtr tvořený sérioparalelním zapojením L – C, příp. i rezistorů)

Oproti rotačním kompenzátorům nejsou tyto kompenzátory závislé na dodávce činné energie.

Prosté kondenzátory:

Je to typ kondenzátorů, který se používá, ke zlepšení účinníku elektrických zařízení na střídavý proud a jsou kladeny tyto požadavky:

1. Tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu
2. Odolnost proti přepětí
3. Spolehlivost a bezpečnost provozu

Po připojení na napětí má jednofázový kondenzátor jalový výkon Q_c podle vztahu:

$$Q_c = \omega \cdot C \cdot U^2 \quad (\text{VAR; rad} \cdot \text{s}^{-1}, \mu\text{F, V}) \quad (9)$$

kde

ω ...úhlová rychlost (pro 50Hz to je hodnota $100 \cdot \pi$),

C ...kapacita kondenzátoru.

Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníka platí:

$$Q_c = \omega \cdot 3 \cdot C_D \cdot U^2 \quad (10)$$

dále

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (11)$$

a z toho pak dostaneme

$$Q_c = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad (12)$$

Pro zapojení kondenzátoru do hvězdy platí:

$$Q_c = \omega \cdot 3 \cdot C_Y \cdot U^2 \quad (13)$$

dále

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (14)$$

a z toho pak dostaneme

$$Q_c = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad (15)$$

Jedna z důležitých podmínek pro platnost předchozích výrazů je symetrie trojfázového zapojení, tj. stejné hodnoty všech kondenzátorů.

Kvalita kondenzátorových baterií výrazně ovlivňuje ztráty. Ztráty v kondenzátorech jsou např. ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů a jiné. Vyznačují se tangentou ztrátového úhlu kondenzátoru tg udávající poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinusovém napětí a kmitočtu. Celkové ztráty kondenzátoru vypočítáme z rovnice:

$$P_z = Q_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (\text{W; VAr, -}) \quad (16)$$

jestliže vycházíme ze sinusového průběhu napětí. Tangenta ztrátového úhlu je rozdílná pro různé technologie výroby a dále závisí na teplotě, a to tak, že roste nejenom s rostoucí teplotou, ale i s teplotou klesající pod 0 °C.

U neharmonického průběhu je potřeba znát ztráty od všech harmonických, pak pro celkové ztráty platí rovnice:

$$P_s = \sum n \cdot Q_n \cdot \operatorname{tg} \delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (17)$$

kde

n ...řád harmonické,

U_n ...napětí harmonické,

F_n ...kmitočet harmonické.

Kondenzátory jsou frekvenčně závislé. Kapacitní reaktance X_c , která je jalovou složkou impedance, je dána vztahem:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (\Omega; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (18)$$

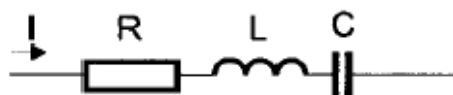
kde

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Hz}) \quad (19)$$

Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se kmitočtem reaktance klesá. Připojíme-li kondenzátor do znečištěné sítě harmonickými, bude impedance kondenzátoru velmi nízká, a tudíž bude procházet kondenzátorem velký proud, který může mít za následek zničení kondenzátoru.

Prosté kondenzátory lze použít pro kompenzaci jalového výkonu v sítích nízkého a vysokého napětí s malými úrovněmi energetického rušení, tj. v sítích, kde podíl nelineárních spotřebičů nepřesáhne 10 až 15% výkonu napájecího transformátoru.

Chráněné kompenzační sekce



obr. 2. 4 Jednoduchý sériový RLC článek

Chráněné kompenzační sekce jsou určeny především do sítí s vyšším podílem nelineárních zátěží (s výskytem harmonických frekvencí), a do prostředí, kde hrozí nebezpečí

vzniku rezonance kompenzační kapacity s indukčností zátěže. Je vhodný do provozů, kde je nutné omezit rušivé působení kompenzačních rozvaděčů na rozvodnou soustavu. Zamezují také nežádoucím platbám za nedodržení účinníku a zlepšují napětíové poměry v síti.

V kompenzačním rozvaděči je sériově zapojená tlumící tlumivka s kondenzátorem tvořící rezonanční LC obvod pracující jako širokopásmový filtrační obvod pro harmonické nad rezonančním kmitočtem obvodu. Tím zamezuje vzniku rezonančních jevů, které by měly za následek snížení životnosti kondenzátorů, vypínání jističů a jiných ochran nebo poškození citlivějších spotřebičů. Tlumivky také omezují amplitudu proudových rázů vznikajících při spínání kondenzátorů.

Frekvence rezonance tlumící tlumivky a kondenzátoru je záměrně volena tak, aby nedocházelo k rezonanci na nějaké charakteristické harmonické a tím k přetěžování kondenzátoru. Tento rezonanční obvod je charakterizován činitelem útlumu p , který odpovídá rezonančnímu kmitočtu podle vztahu:

$$p = \left(\frac{f_1}{f_r} \right)^2 \cdot 100 \quad (\%, \text{Hz}^{-1}, \text{Hz}^{-1}) \quad (20)$$

kde

p ...činitel útlumu

f_1 ...základní frekvence

f_r ...rezonanční frekvence

Pro 3. řád harmonické (150 Hz) to je zpravidla volí 134 Hz ($p=14\%$), 5. řád harmonické (250 Hz) to je zpravidla 189 Hz ($p=14\%$), protože zde se musí vzít v úvahu vysílací frekvence HDO ($216 \frac{2}{3}$ Hz) nebo 210 Hz ($p=5,67\%$) bez signálu HDO nebo s vysílací frekvencí $183 \frac{1}{3}$ Hz od kterého musí být dostatečný odstup, aby obvod neodsával tónovou frekvenci vysílače. Tento LC obvod pak i částečně tuto dominantní harmonickou filtruje a tím snižuje celkové zkreslení napětí THD_U .

Reaktance LC obvodu:

$$X_{LC} = \left(1 - \frac{p}{100} \right) \quad (\Omega; \%) \quad (21)$$

kde

X_{LC} ...reaktance LC obvodu

X_C ...kapacitní reaktance

Skutečný výkon chráněného kompenzačního LC obvodu (kondenzátor s tlumící tlumivkou) bude:

$$Q_{LC} = \frac{U_{SN}^2}{X_{LC}} \quad (\text{VAr}; \text{V}, \Omega) \quad (22)$$

kde

Q_{LC} ...jalový výkon LC obvodu
 U_{SN} ...jmenovité sdružené napětí sítě

nebo

$$Q_{LC} = \left(\frac{U_N}{U_{CN}} \right)^2 \cdot \frac{Q_C}{1 - \frac{p}{100}} \quad (\text{VAr; V, V, VAr, \%}) \quad (23)$$

kde

U_N ...jmenovité napětí sítě
 U_{CN} ...jmenovité napětí kondenzátoru
 Q_C ...jalový výkon kondenzátoru

Napětí na kondenzátoru vypočítáme

$$U_C = \frac{U_{SN}}{\frac{p}{100} + 1} \quad (\text{V; V, \%}) \quad (24)$$

Podle hodnoty napětí U_C pak zvolíme jmenovité napětí kondenzátoru vyšší než je tato hodnota.
 Dosazením do vzorce pak dostaneme kapacitu kondenzátoru

$$C = \frac{I}{U_C 2\pi f} \quad (\text{F; V, Hz}) \quad (25)$$

kde

C ...kapacita kondenzátoru
 U_C ...napětí na kondenzátoru
 f ...frekvence sítě

Z kapacitní reaktance a činitele útlumu vypočítáme induktivní reaktanci tlumivky

$$X_L = X_C \cdot \frac{p}{100} \quad (\Omega; \Omega, \%) \quad (26)$$

kde

X_L ...induktivní reaktance
 X_C ... kapacitní reaktance

Induktivní reaktance poslouží ke stanovení indukčnosti tlumivky ke kondenzátoru a jejímu správnému výběru

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (\text{H; } \Omega, \text{ Hz}) \quad (27)$$

Kompenzační filtry

Kompenzační filtr je sériový rezonanční LC obvod, který filtruje harmonické proudy, vznikající na různých zařízeních připojených na síť. V praxi je nejčastěji takové zařízení řešeno jako několik samostatných LC obvodů naladěných na jednotlivé harmonické. Jejich návrh se nejčastěji provádí na základě analýzy energetického rušení v síti.

Sériový LC obvod je v sítích NN naladěn na harmonickou frekvenci (rezonanční frekvenci), při které má minimální impedanci. Tyto LC obvody se připojují paralelně k rozvodové soustavě co nejbližší místu vzniku harmonických frekvencí. Eliminací harmonických složek proudu se také sníží obsah harmonických napětí a zlepší se tím i kvalita síťového napětí.

Kompenzační filtr tvoří sériový RLC obvod, kde ohmická (ztrátová) složka R představuje sériový odpor. Impedance obvodu je

$$Z = R + j \left(\frac{\omega L - 1}{\omega C} \right) \quad (\Omega; \Omega, \text{rad.s}^{-1}, \text{H}, \text{rad.s}^{-1}, \text{F}) \quad (28)$$

kde

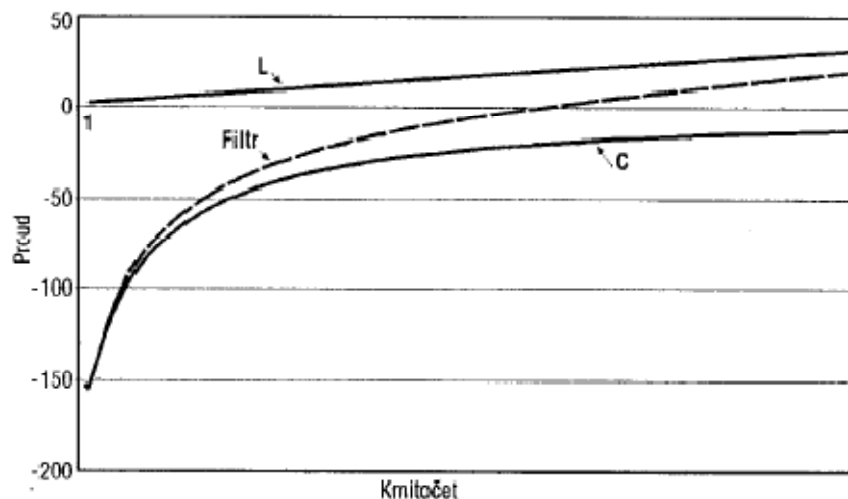
Z...impedance

R...ohmický odpor

ω ...úhlová rychlost

L...indukčnost tlumivky

C...kapacita kondenzátoru



obr. 2. 5 Kmitočtové charakteristiky L, C a LC filtru

Kompenzační filtr se chová pro frekvence menší než rezonanční jako kapacita a pro 1. harmonickou kompenzuje jalový výkon. Pro rezonanční frekvenci, na kterou je naladěn, představuje zkrat a pro vyšší frekvence má induktivní charakter.

Pokud uvažujeme i odpor R, pak obvodem prochází proud závislý na frekvenci:

$$I = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (\text{A; V, } \Omega, \text{ rad.s}^{-1}, \text{ H, } \Omega, \text{ rad.s}^{-1}, \Omega, \text{ F}) \quad (29)$$

kde

I...proud

U...napětí

R...ohmický odpor

Čistě ohmický proud je

$$I_R = \frac{U}{R} \quad (\text{A; V, } \Omega) \quad (30)$$

Z toho vyplývá, že pokud je výraz pod odmocninou roven 1, pak obvod odebírá činný proud. K tomu dochází právě v rezonanci, když $\omega = \omega_r$ a tedy

$$\frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r RC} = Q \quad (31)$$

kde

ω_r ...úhlová rychlost v rezonanci

Q...činitel jakosti filtru

Současně je takto definován činitel jakosti filtru Q.

Výraz

$$F = \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \quad (32)$$

kde

F...činitel rozladění

definuje činitel rozladění. Kmitočtovou závislost LC obvodu charakterizují kmitočty, při nichž poměr proudů klesne pod $1/\sqrt{2}$. Tuto hodnotu splňují dvě hodnoty součinu

$$\pm 1 = FQ \quad (33)$$

Z předchozích vztahů vyplývá, že snižování činitele jakosti vede ke snižování amplitudy proudu v rezonanci a ke zvyšování činitele rozladění.

b) podle způsobu regulace

Kompenzátory s konstantním výkonem

Jsou to neregulované kondenzátorové baterie, nebo kompenzační filtry spínané samostatným spínačem nebo společně s kompenzovaným spotřebičem (individuální kompenzace asynchronních motorů nebo transformátorů)

Kompenzátory se stupňovitou regulací

Jsou to samostatně spínané kondenzátory pomocí stykačů NN (speciální stykače pro spínání kapacit) ovládaných regulátorem účinníku moderní konstrukce, nebo bezkontaktních polovodičových spínačů se speciální regulací pro omezení přechodných dějů při spínání kondenzátorů; pro VN pomocí vakuových vypínačů nebo stykačů

Kompenzátory s plynulou regulací

Jedná se o synchronní kompenzátory, statické kompenzátory (popř. s filtry jednotlivých harmonických) doplněné paralelně připojenou dekompenzační fázově řízenou tlumivkou (TCR+FC), dále se jedná o polovodičové kompenzátory

Aktivní filtry

Nový technický prostředek umožňující eliminovat energetické rušení, zejména kolísání napětí v provozech s výraznými dynamickými odběry jalového výkonu (např. svařovny, obloukové pece apod.) a současně snižovat obsah harmonických. V principu se jedná o sériově nebo paralelně zapojené generátory proudu či napětí tvořené můstkovým zapojením polovodičových spínačů (statický měnič na bázi IGBT tyristorů s napěťovým zdrojem tvořeným kondenzátory). Vhodným regulačním systémem pak v případě paralelního zapojení filtru přes vazební tlumivku injektuje tento statický měnič do místa připojení zbytkovou křivku proudu, tj. rozdíl mezi ideální sinusovou křivkou proudu (soufázovou s křivkou napětí) a křivkou proudu odebíraného kompenzovaným spotřebičem. V případě „sériového zapojení“ přes vazební tlumivku a vazební transformátor zlepšuje měnič křivku napájecího napětí. Kombinací obou zapojení a zařazením pasivního filtru (dolní propust) mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť lze řešit složité případy pro dosažení EMC (nesymetrie odběrů, filtrace proudu nulovým vodičem apod.)

c) podle umístění kompenzátoru

Individuální kompenzace

Kondenzátor je připojen přímo na svorkách spotřebiče jalového výkonu nebo je společně s ním připojen k síti samostatným stykačem (vhodné pro velké motory, které pracují delší dobu nebo trvale) – nutná vhodná volba kompenzačního výkonu, nebezpečí samobuzení a přepětíových jevů. Příklad takové kompenzace je uveden na obr.

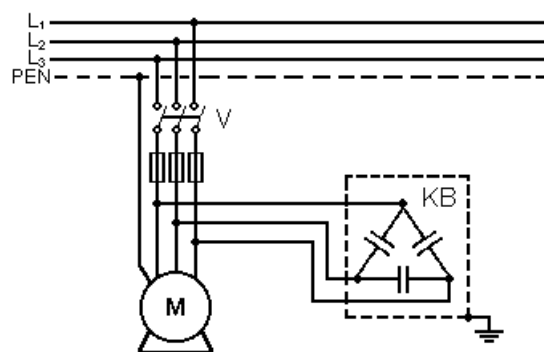
Výhody tohoto způsobu kompenzace

- induktivní výkon se kompenzuje přímo v místě vzniku,

- odlehčení přívodů a celé sítě, zmenšení ztrát ve vedení a úbytku napětí - největší ze všech způsobů kompenzace,
- při správně navržené kompenzaci nevznikne nebezpečí překompenzace,
- statický kondenzátor nepotřebuje zvláštní vypínač a u nízkého napětí ani pojistky a vybíjecí odpory,
- nevznikají spínací přepětí.

Nevýhody :

- malé využití instalovaného výkonu kondenzátorů u strojů s malou dobou využití,
- obtížnější kontrola při rozptýleném umístění kompenzovaných zařízení.



obr. 2. 6 Individuální kompenzace

Skupinová kompenzace

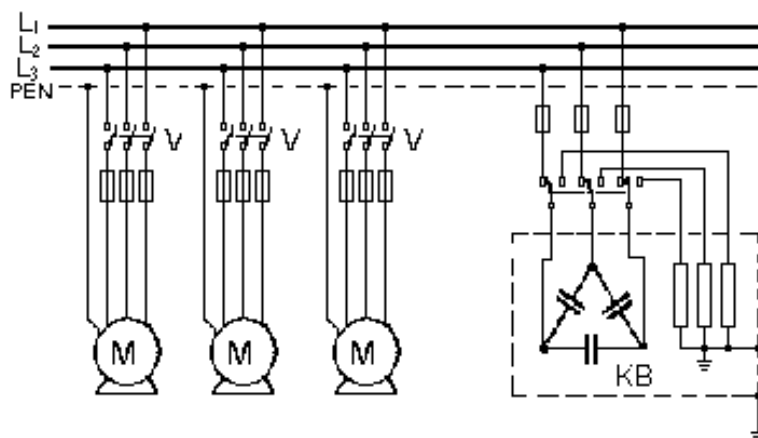
Regulovaný kompenzátor připojen na přípojnicích rozváděče skupiny spotřebičů, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší
Výhody tohoto způsobu kompenzace :

- velikost kapacitního výkonu je nižší než u individuální kompenzace vzhledem k soudobosti spotřebičů, tzn. lepší využití kondenzátorů,
- odlehčení napájecího vedení je až po skupinovou kompenzací.

Nevýhody skupinové kompenzace :

- vedení od skupinového rozváděče ke spotřebičům nejsou proudově odlehčena, a tedy v nich nevznikají úspory ztrát a nezíská se zlepšení úbytků napětí,
- kondenzátory musí mít vypínače, pojistky a vybíjecí zařízení,
- je nutná regulace kompenzačního zařízení.

V dnešní době už pozbývá skupinová kompenzace svůj význam neboť je preferována individuální kompenzace spotřebičů, kde je to možné. Velice je tato kompenzace vhodná, pro různé výrobní linky s mnoha asynchronními motory.



obr. 2. 7 Skupinová kompenzace

Centrální kompenzace

Regulovaný kompenzátor je připojen na přípojnice vstupní trafostanice, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon opět menší. Z důvodu odlehčení části napájecího vedení můžeme připojit kompenzační zařízení na podružný rozváděč v místě největší spotřeby.

Výhody centrální kompenzace účinníku :

- velikost kondenzátorové baterie je ve srovnání s předchozími způsoby vlivem nesoučasnosti spotřebičů nejmenší a tedy využití je největší,
- kompenzační zařízení je přehledné - na jednom místě, tím je jeho kontrola snadnější.

Nevýhody centrální kompenzace účinníku :

- kondenzátorová baterie musí být opatřena složitou samočinnou regulací,
- rozvodná síť závodu není odlehčena od přenosu induktivního výkonu,
- obtížné zvětšování kompenzačního zařízení při rozšíření závodu.

Smíšená kompenzace

Je to kombinace výše uvedených způsobů.

d) Způsoby zapojení statických kompenzátorů

Nechráněná kondenzátorová baterie je převážně používaná; v síti s výskytem harmonických může však docházet k rezonancím s indukčností sítě a ohrožení kondenzátoru i paralelně připojených spotřebičů, není omezena velikost nabíjecího proudu při připojení k síti; měrné ztráty jsou max. 0,5W/kVAr.

Chráněná kondenzátorová baterie je tvořena sériovou kombinací tlumivky a kondenzátoru, obvod je laděn na rezonanční kmitočet, na kterém se v síti nevyskytují harmonické (např. 189Hz, $p=7\%$) a hradící účinek tlumivky zabráňuje rezonančním jevům v síti; měrné ztráty jsou vyšší - max. 5,5 až 7W/kVAr. Kondenzátory nutno dimenzovat na vyšší hladinu napětí, neboť vlivem tlumivky dochází ke zvýšení napětí na kondenzátoru.

Pro vytvoření **filtru harmonických** je nutno obvod naladit na kmitočet vybraných harmonických generovaných nelineárními spotřebiči (měniče, obloukové pece atd.), obvyklý kmitočet je 250, 350, 550, 650Hz. Kondenzátory nutno dimenzovat na vyšší hladinu napětí (+10%) a je nutné počítat při dimenzování tlumivky i se zvýšeným zatížením harmonickými proudy odsávanými ze sítě.

Tyristorově řízená tlumivka + pevná kondenzátorová baterie (TCR+FC) – zdrojem kapacitního výkonu je soustava paralelně řazených kompenzačních filtrů; proud paralelně zapojené dekompenzační tlumivky, která odebírá ze sítě jalový induktivní výkon, je regulován fázově řízeným měničem. Výhodou zapojení je plynulá a rychlá regulace kompenzačního výkonu (doba odezvy je 2-10ms). Používá se v sítích NN i VN s použitím speciálního regulátoru pro kompenzování i nesymetrických odběrů.

e) Spínání statických kompenzátorů NN

· **stykač (AC3)** – přechodný proudový děj při spínání kondenzátoru není omezen, závisí na zkratových poměrech v síti, na impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Amplituda nabíjecího proudu jednoho připínaného stupně při zkratovém proudu 10-50kA bývá 200 až 1200A, amplituda nabíjecího proudu dalšího připínaného stupně, kdy je v chodu podstatná část kondenzátorů kompenzačního zařízení, je omezena pouze impedancí vodičů uvnitř rozváděče bývá 1300-2500A. Stykače pro třídu AC3 dovolují proudové přetížení do výše 10-ti násobku jmenovitého proudu, tj. prakticky do 250 až 1000A (běžně používané stykače s $I_N = 25-100A$), elektrická životnost zařízení je malá (běžně řádově 10⁴ sepnutí při 400V). Proudový ráz při spínání nutno omezit na přijatelnou hodnotu zvýšením impedance přívodů ke kondenzátorům, tj. např. vzduchovou tlumivkou (>10-100μH) nebo odporem (>1 Ω).

· **stykač pro spínání kondenzátorů (odporové spínání)** – V současné době je na našem trhu několik typů speciálních stykačů pro spínání kapacit s odporovým omezením nabíjecího proudu kondenzátoru. Spínání probíhá postupně - nejdříve přes odpor pomocí předstihového kontaktu a po odeznění přechodného děje hlavní kontakt přebírá ustálenou hodnotu proudu kondenzátoru. Stykače některých výrobců po sepnutí hlavních kontaktů uvolní předstihový kontakt a zamezí tak možné havárii stykače při poruše hlavního kontaktu. Proudový ráz při spínání je u těchto stykačů omezen a je zaručena vysoká elektrická životnost zařízení.

- **bezkontaktní polovodičový spínač** – Tyto spínače jsou určeny pro okamžité spínání kondenzátorů ve speciálních tzv. rychlých kompenzátorech. Jejich předností je řízený okamžitý sepnutí v okolí průchodu napětí na spínači nulou, spínání probíhá bez přechodného proudového děje a umožňuje opakované sepnutí v časech jedné periody síťového kmitočtu (20ms) při regulaci rychlých impulzních odběrů.

2.5 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

2.5.1 Stupňovité řízené kompenzátory

U stupňovitě řízeného kompenzačního zařízení je důležitou volbou počet a velikost jednotlivých stupňů. Volba počtu závisí na ne velikosti jednoho stupně, potřebném kompenzačním výkonu a zadané hodnotě vykompenzování.
(EMG Zlin)

$$N \geq \frac{Q_L - P \tan \varphi_0}{Q_{C1}} \quad (-; VAr, W, -, VAr) \quad (34)$$

kde

N...počet stupňů

Q_L ...jalový induktivní výkon zátěže

P...činný výkon

Q_{C1} ...jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

Velikost kompenzačního stupně lze určit z minimálního průměrného odebíraného výkonu:

$$Q_{C1} = P_{\min} \tan \varphi \quad (VAr; W, -) \quad (35)$$

kde

P_{\min} ...minimální činný výkon

V praktických aplikacích nemusí být jednotlivé stupně stejně velké, ale odvození platí pro nejmenší stupeň a další stupně jsou nejčastěji jeho násobky.

Kontaktní spínání

Regulované kontaktní kompenzátory pracují na principu přímého připínání kompenzačních sekcí na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu. Používají se v aplikacích, kde nejsou kladeny nároky na rychlost kompenzace.

Při použití klasických stykačů je velkým nedostatkem vznik přechodových dějů při připnutí kondenzátorů na síť. Velké proudové rázy mohou dosahovat až 30-ti násobku jmenovitého proudu. Často mohou způsobit i vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv na napájecí síť. Tyto nevýhody lze eliminovat předřazením ochranných (tlumících) tlumivek a zejména použitím stykačů s odporovým spínáním.

Stykače s odporovým spínáním jsou speciální variantou klasických stykačů. Jsou to stykače se dvěma sadami kontaktů, z nichž jedna spínaná v předstihu má v sérii spínací rezistory, zatímco druhá sada hlavních kontaktů tyto rezistory v zápětí překlene a připne kondenzátor k plnému napětí.

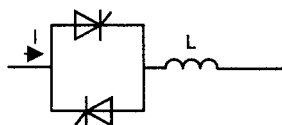
Bezkontaktní spínání

Bezkontaktní spínání se používá tam, kde jsou kladeny nároky na rychlost změny jalového výkonu. Současně je nutno použití rychlého regulátoru jalového výkonu. U bezkontaktních kompenzačních sekcí je nahrazen stykač bezkontaktním spínačem. Kondenzátorům se zde předřazují ochranné (tlumící) tlumivky, aby se zamezilo přechodovým jevům a proudovým rázům při připnutí kondenzátoru na síť (nastalo by zničení polovodičového spínače). Použití tlumících tlumivek účinně hradí i harmonické frekvence.

V praxi je tento bezkontaktní spínač tvořen dvojicí antiparalelních tyristorů. Požadavky na toto spojení tyristorů vyžadují nutnost spínání tyristorů při průchodu nulou, tedy synchronně se sítí. Tento požadavek spolu s požadavky na rychlost spínání a opakování sepnutí kondenzátorů i částečně nebo plně nabitých komplikuje provedení řídicích obvodů.

2.5.2 Plynlé řízení - pasivní

Plynulé řízení jalového proudu je možné uskutečnit řízením proudu procházejícího tlumivkou. Použije-li se fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení, získáme základní zapojení výkonového obvodu dle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

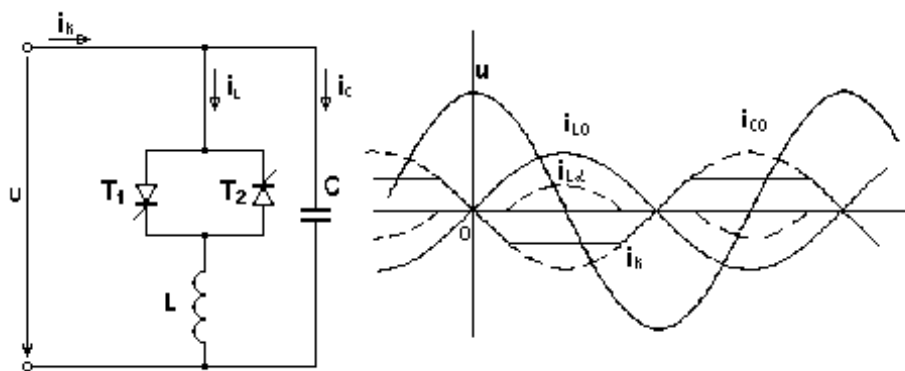


**obr. 2. 8 Fázové řízení proudu
při indukční zátěži**

Tento, pro jednoduchost jednofázový obvod umožňuje měnit čistě indukční proud od nulové hodnoty až do plné hodnoty dané impedancí tlumivky L .

Chceme-li řídit kapacitní proud, nelze použít fázově řízený spínač a tlumivku pouze nahradit kondenzátorem. Problémem jsou přechodové jevy.

Řešení je však prosté, stačí, když se paralelně k původnímu obvodu spínače a tlumivky připojí kondenzátor.



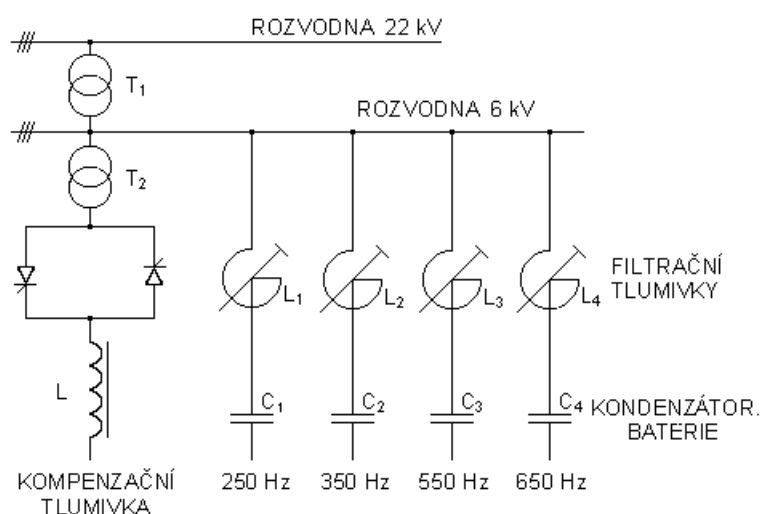
obr. 2. 9 Zapojení a průběh napětí a proudu při paralelním připojení kondenzátoru a filtru

Základním problémem je fakt, že z hlediska přepětových jevů nelze bez potíží spínat kondenzátor pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nebo pomocí triaku). Proto je spínána indukčnost a kapacita (kondenzátor) je zapojen trvale. Velikost kompenzačního výkonu je závislá na úhlu zpoždění sepnutí tyristorů α .

Při maximálním otevření ($\alpha = 0$) je proud indukčností a kapacitou stejný, proudy jsou v protifázi, takže výsledný kompenzační výkon je nulový. Při „zavírání“ proudu i_L se projeví vliv kapacitního proudu i_C a kompenzátor začne dodávat kompenzační proud i_k . Princip je patrný z časových průběhů proudů a napětí na obr. 2. 9.

V současné době se problém kompenzace účinníku spojuje s filtrací harmonických napětí a proudů. Kompenzační kondenzátor je nahrazen filtry příslušných harmonických (v podstatě jsou to sériové rezonanční obvody, které způsobují pro danou harmonickou v rezonanci zkrat). Pro základní harmonickou mají tyto filtry kapacitní charakter, jsou tedy také prostředkem pro kompenzaci účinníku.

Jedna z možností zapojení takové filtračně kompenzační baterie je na následujícím obrázku.



obr. 2. 10 Zapojení filtračně kompenzačních baterií v průmyslu

Filtry filtrují komponenty harmonických vlastního kompenzátoru a současně i soustavu, kterou kompenzují. Vhodné je použít v každé fázi kompenzační filtr na 5., 7. a dále na 11. a 13. harmonickou. Dimenzování filtrů a jejich poměrné rozdělení závisí zejména na charakteru kompenzované nelineární zátěže. Pro představu uveďme vhodné poměrné rozdělení kompenzačního výkonu pro řízený šestipulsní usměrňovač, které je pro filtry 5., 7., 11. a 13. harmonické v poměru 3 : 2 : 1 : 1.

Správné nadimenzování kompenzačního filtru u plynule řízeného kompenzátoru je velice důležité a má rozhodující vliv na funkčnost, spolehlivost a životnost celého kompenzátoru.

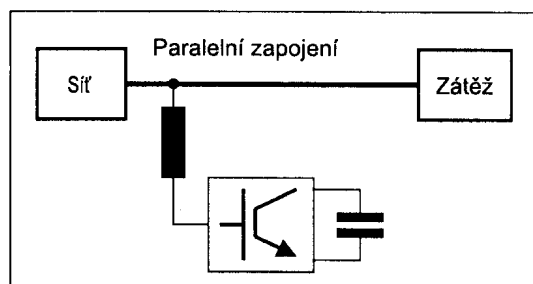
2.5.3 Plynule řízené – aktivní

Aktivní filtry lze chápat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Podle těchto požadavků lze aktivní filtry dělit na paralelní (derivační), sériové a kombinované.

Paralelní aktivní filtr

Paralelní aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Je schopen odstranit nežádoucí harmonické proudy tím způsobem, že generuje shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Výsledný proud je potom zbaven zvolených harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě, a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží. Takto je možné v každém okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci. Generováním jalové složky první harmonické proudu je paralelní aktivní filtr schopen provádět velmi rychlou kompenzaci jalového proudu, popřípadě pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze tyto vlastnosti libovolně kombinovat.

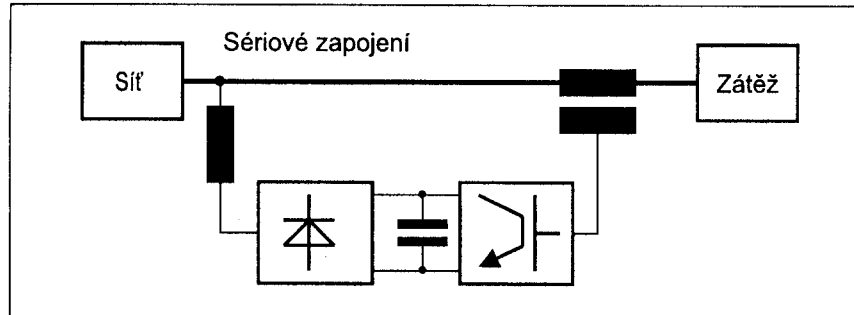
Generátor proudu či napětí může být tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT). Jedná se o shodné zapojení s můstkem střídače pro regulovaný pohon, tzn. že ve třífázovém provedení obsahuje šest spínačů a zdroj proudu či napětí. V praxi se však osvědčil typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátory. Vhodným spínáním tranzistorů můstku lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru. Tento proud však obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence (jednotky až desítky kHz). Proto je nutné zařadit mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr pracující jako dolní propust.



obr. 2. 11 Připojení filtru na síť

Sériové aktivní filtry

Aktivní sériový filtr je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče a je tvořen generátorem napětí. Tento filtr umožňuje upravit přiváděné napětí na požadovaný tvar.



obr. 2. 12 Sériové aktivní filtr a jeho připojení do sítě

Podobně jako upravuje paralelně zapojený filtr proud, je zde upravováno napětí. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, ale také dodávat energii při výpadku napájecího napětí (za podmínky, že je filtr napájen nezávislým zdrojem).

Z popsaných vlastností obou způsobů zapojení je zřejmé, že derivační filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériové filtry upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči - dodávají zátěži kvalitnější napětí.

Kombinované aktivní filtry

Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek, čímž vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný odebíraný průběh proudu.

2.6 Zásady pro návrh kompenzačního prostředku

(NAVARIS.CZ)

Kompenzační zařízení musí být navrženo vzhledem k prostředí, ve kterém bude pracovat, to je zejména odvislé od technologického vybavení firmy. Proto je potřeba získat co možná největší přehled a informace o daném odběru. V následujícím přehledu jsou uvedeny některé charakteristické prvky odběrů:

- pomalé změny odebíraného výkonu
- rychlé změny (mžikové) odebíraného výkonu (bodovky, jeřáby, rychlozdviže, ...) obvykle doprovázené výskytem harmonických, protože spínání se například provádí bezkontaktními polovodičovými prvky
- administrativní budovy s počítačovými sítěmi
- objekty s rozsáhlými osvětlovacími soustavami
- linky s řízenými pohony
- těžký hutní provoz s tavicími pecemi (obloukové, indukční, odporové s řízené polovodiči, ...)

Komplexní přehled o denním diagramu zatížení a obsahu harmonických získáme prostřednictvím měření síťovým analyzátozem, z údajů digitální měřící soupravy energetiky a z odběrových diagramů či faktur za odebranou elektrickou energii. Na základě těchto hodnot se s určitou rezervou navrhne výkon kompenzační baterie a podle kolísání odběru se stanoví nejmenší stupeň a optimální řazení výkonu. Jednotlivé stupně je třeba zkontrolovat na možnost rezonance s napájecím transformátorem, respektive na možnost odsávání frekvence HDO. Vhodným měřítkem pro zhodnocení vlivu měničů a ostatních zdrojů harmonických je tzv. „Zkratové číslo“ (ZČ), které je definováno:

$$ZČ = \frac{S_T}{e_k \cdot S_p} \quad (-; VA, -, VA) \quad (36)$$

kde

S_T ...zkratového výkonu v místě připojení odběru

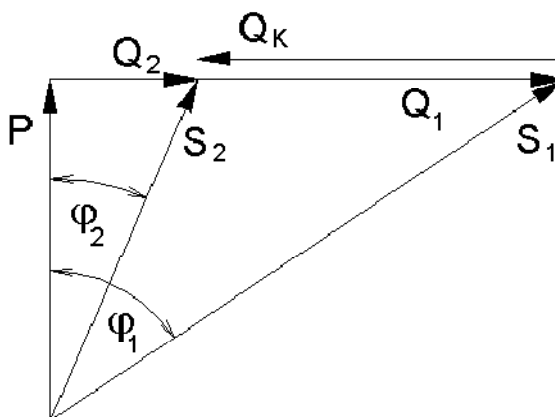
$e_k \cdot S_p$...zdánlivý výkon všech zdrojů harmonických.

Pokud je toto číslo:

- **větší než 200** je riziko vlivu harmonických **malé** a lze použít nechráněný kompenzační rozváděč
- **v intervalu 200 až 100** je míra rizika **střední** a je nutné použít chráněný kompenzační rozváděč
- **menší než 100** je toto riziko již **veliké** a je nutné použít laděné filtry k eliminaci harmonických

2.7 Stanovení výkonu kompenzačního zařízení

Pro stanovení potřebného kompenzačního výkonu je potřeba znát celkový výkon kompenzovaného stroje, požadovaný a cílový účinník. Je možné stanovit velikost kompenzovaného výkonu buď výpočtem, nebo z měření. Na následujícím obrázku je znázorněn fázový diagram před a po instalaci kompenzační baterie při stejném činném výkonu.



obr. 2. 13 Fázový diagram před a po instalaci kompenzační baterie

(Hradílek, 2008)

Kompenzační výkon potřebný k dosažení požadovaného účinníku se vypočte podle vztahu:

$$Q_K = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (\text{VAR; W, -, -}) \quad (37)$$

kde

$Q_K \dots$ je požadovaný kompenzační výkon kondenzátoru

$P \dots$ činný výkon zátěže

$\cos \varphi_1 \dots$ původní účinník před korekcí

$\cos \varphi_2 \dots$ cílový účinník.

Ekonomická výhodnost kompenzace jalové energie a její rychlá návratnost je patrná při eventuelním porovnání faktur za odebranou elektrickou energii v případě kompenzovaného a nekompenzovaného odběru. Při nedodržení podmínek stanovených v platné Sbírce zákonů, cenových rozhodnutí ERÚ, prováděcích pokynů k těmto dokumentům a hodnot uvedených v přihlášce (smlouvě) k odběru elektřiny je připočítávána cenová přírážka za nedodržení neutrální hodnoty účinníku. Při měření v reálném čase je penalizována i nevyžádaná dodávka jalové energie (tj. překompenzování). Proto je nutné, aby kompenzační baterie byla osazena skutečně kvalitním regulátorem jalového výkonu s co nejvyšší citlivostí. Další úsporou je eliminace ztrát ve vedeních, transformátorech a ostatních prvcích přenosové cesty, dodatečným využitím odlehčených vedeních a podobně. Pokud známe spotřebu činné energie P , jalové energie Q a počet provozních hodin zátěže t [h], můžeme původní účinník $\cos \varphi_1$ vypočíst podle vztahu:

$$\cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}} \quad (-; \text{kVAr}\cdot\text{h}^{-1}, \text{kW}\cdot\text{h}^{-1}) \quad (38)$$

a nebo pro $\text{tg}\varphi$ platí:

$$\text{tg}\varphi = \frac{B}{A} \quad (-; \text{kVAr}, \text{kWh}) \quad (39)$$

Průměrný činný výkon zátěže pak vypočteme:

$$P = \frac{A}{t} \quad (\text{W}; \text{Wh}, \text{h}) \quad (40)$$

Stanovíme cílový účinník $\cos\varphi_2$, (např. podle požadavku rozvodných závodů 0,95-0,98, v případě kombinované kompenzace podle umístění kompenzačního prvku). Výkon kondenzátorové baterie potřebný ke změně fázového posuvu pak zjistíme dosazením do rovnice č. 37.

Výpočty kondenzátorů v závislosti na druhu zapojení do sítě: (EMCOS s.r.o)

- *pro jednofázové zapojení*

Výkon kondenzátoru

$$Q_{C1} = U^2 \cdot \omega \cdot C_1 \quad (\text{VAr}; \text{V}, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (41)$$

Kapacita kondenzátoru

$$C_1 = \frac{Q_{C1}}{U^2 \omega} \quad (\text{F}; \text{VAr}, \text{V}, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (42)$$

Proud kondenzátoru

$$I_{C1} = \frac{Q_{C1}}{U} = U \omega C_1 \quad (\text{A}; \text{VAr}, \text{V}) \quad (43)$$

– *třífázové zapojení trojúhelník*

Napětí kondenzátoru

$$U_C = U \quad (\text{V}) \quad (44)$$

Výkon kondenzátoru

$$Q_C = 3 \cdot Q_{C1} = 3 \cdot U^2 \omega C_1 \quad (\text{VAr}; \text{V}, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (45)$$

Kapacita kondenzátoru

$$C = 3 \cdot C_1 = \frac{Q_C}{U^2 \omega} \quad (\text{F}; \text{VAr}, \text{V}, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (46)$$

Proud kondenzátoru

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\sqrt{3} \cdot Q_{C1}}{U} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot C_1 \quad (\text{A}; \text{VAr}, \text{V}) \quad (47)$$

– třífázové zapojení do hvězdy

Napětí kondenzátoru

$$U_C = U_f \quad (\text{V}) \quad (48)$$

Výkon kondenzátoru

$$Q_{CY} = 3 \cdot Q_{C1Y} = 3 \cdot U_f^2 \cdot \omega \cdot C_{1Y} \quad (\text{VAr; V, rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (49)$$

Kapacita kondenzátoru

$$C = 3 \cdot C_{1Y} = \frac{Q_{CY}}{U^2 \omega} \quad (\text{F; VAr, V, rad} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (50)$$

Proud kondenzátoru

$$I_C = \frac{Q_{C1Y}}{U_f} = \frac{\sqrt{3} \cdot Q_{C1}}{U} = U_f \cdot \omega \cdot C_{1Y} \quad (\text{A; VAr, V}) \quad (51)$$

2.8 Vliv kompenzačních zařízení na napájecí síť

2.8.1 Rezonanční jevy

Vlivem kapacitního charakteru hlavně venkovních sítí VVN a kabelových sítí VN dochází na některém rezonančním kmitočtu ke změně původně indukčního charakteru impedance elektrické sítě základní harmonické na kapacitní. Protože se v síti vyskytují soustředěné kapacity v podobě nehrazených kondenzátorových baterií dochází k rezonancím i v sítích NN, tlumení rezonančního obvodu je menší než u sítí bez soustředěných kapacit a rezonance se většinou posunuje k nižším kmitočtům. Pokud se v síti budou provozovat nelineární spotřebiče, které generují harmonické proudy na kmitočtech blízkých rezonančnímu kmitočtu, dojde k zesílení těchto harmonických proudů vlivem paralelní rezonance. Značným zdrojem harmonických začínají být provozované větší počítačové sítě, které vzhledem k synchronnímu režimu spínaných zdrojů silně deformují křivku proudu a navíc způsobují proudové přetížení středního vodiče. Harmonické proudy dále zatěžují transformátor, nadřazenou síť a vlastní nehrazené kompenzační zařízení, které bývá dimenzováno na zatížení pouze základní harmonické a může proto dojít k jeho zničení. Dále dochází v uzlu harmonické v okolí rezonančního kmitočtu ke zvýšení harmonických napětí a následně k rušení připojených spotřebičů. Rezonanční kmitočet se bude měnit v závislosti na počtu připojených kompenzačních stupňů.

Nebezpečnému proudovému přetížení kompenzačních zařízení je nutno předcházet vhodnou konfigurací sítě, např. nepřipustit překompenzování a kompenzaci při nízkém činném zatížení. Rezonance jsou účinně tlumeny některými spotřebiči, jako jsou žárovky, odpory a hlavně asynchronní motory. Dalším účinným prostředkem pro omezení rezonancí je zatlumení tj. předřazení tlumivky před kondenzátorovou baterii, a to takové velikosti, aby rezonanční

kmitočet obvodu byl nižší než rezonanční kmitočet odpovídající reaktanci napájecí sítě a současně mimo některý budící kmitočet. Prakticky lze obvod ladit na kmitočet nižší než 3. harmonická (např. 120Hz), nebo na okno mezi nejvýraznějšími rezonancemi 3. a 5. harmonické, tj. na kmitočet 189Hz. Chceme-li laděný obvod provozovat jako sací filtr, nutno jej ladit na kmitočet blízký rezonančnímu a danou tlumivku a kondenzátor vhodně dimenzovat. Stupňové chráněné kompenzátory mají pouze částečný filtrační účinek (závislý kromě naladěného kmitočtu i na jakosti tlumivek), jejich ochranné tlumivky hlavně snižují riziko rezonancí.

2.8.2 Přechodné děje při spínání a vypínání kondenzátorů

Přechodný proudový děj při spínání kondenzátoru závisí na zkratových poměrech v síti, na impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Amplituda nabíjecího proudu jednoho připínaného stupně při zkratovém proudu 10-50kA bývá 200 až 1200A, kde nižší hodnoty platí pro menší kondenzátory ($<100\mu\text{F} \approx 5\text{kvar}$) a nižší zkratové poměry v síti, vyšší hodnoty platí pro větší kondenzátorové baterie (např. 50kvar) připojené blízko napájecím transformátorům.

Amplituda nabíjecího proudu dalšího připínaného stupně, kdy je v chodu podstatná část kondenzátorů kompenzačního zařízení, je omezena pouze impedancí vodičů uvnitř rozváděče ($R < 10^{-3}\Omega$, $L < 10\mu\text{H}$) a bývá 1300 až 2500A. Tyto proudové rázy mají krátké trvání (několik period kmitočtu řádu kHz), ale jejich velikost rozrušuje materiál kontaktů stykače, neboť vznikají v okamžiku, kdy se kontakty dotýkají ještě pod malým tlakem a jejich kontaktní plocha je malá, takže přechodný odpor je velký. To má za následek značné ohřátí materiálu kontaktů, jejich místní roztavení což dále zhoršuje jejich styk na počátku sepnutí a vede k dalšímu zvýšení teploty kontaktů. Životnost běžného stykače (AC3) se tak značně snižuje, dochází ke spékání kontaktů a následně vlivem trvale připnutého kompenzačního výkonu ke zvýšení napětí a příp. k havárii zařízení. Současně jsou proudové a přepětové rázy takto připínaných kondenzátorů zdrojem značného rušení a jejich šířením po vedení a interakcí do řídicích obvodů technologických počítačů mohou být způsobeny poruchy některých zařízení.

Pro omezení proudového rázu při sepnutí je nutno zapínat kondenzátory přes vzduchovou omezovací tlumivku nebo přes odpor. Po vypnutí zůstává na kondenzátoru elektrický náboj až o velikosti amplitudy provozního síťového napětí ($\sqrt{2} \cdot U_n$). Mezi kontakty přístroje se při jejich rozpojení může vyskytnout až dvojnásobek amplitudy síťového napětí a při pomalém odpínání kontaktů (např. ručního vypínače, odpojovače) může dojít ke vzniku oblouku a k opětovnému připnutí kondenzátoru, dochází k ještě větším nadproudům a následnému přepětí, příp. průrazu kondenzátoru a zničení přístroje. Pro snížení zbytkového elektrického náboje a napětí na kondenzátoru po jeho vypnutí je nutné náboj vybit např. pomocí rychlovybíjecích odporů; zbytkové napětí v okamžiku opakovaného sepnutí téhož kondenzátoru nesmí překročit 10% jmenovitého napětí.

2.8.3 Samobuzení

Jedná se o zvláštní případ ferorezonance a vzniká paralelním připojením kondenzátoru a statoru indukčního motoru nebo generátoru, tzn. sériové zapojení rozptylové reaktance statoru a kapacity. Při individuální kompenzaci, při níž je kondenzátor trvale připojen na svorky motoru, se rotor po vypnutí motoru (s kondenzátorem) vlivem setrvačných hmot (setrvačného momentu

GD2) otáčí a dobíhá. Kondenzátor se vybíjí přes stator motoru a dodává mu magnetizační energii pro vytvoření elektromagnetického pole. Naindukovaný proud v rotoru vyvolává ztráty v železe a v mědi, rotor se účinně brzdí – z asynchronního motoru se stává asynchronní generátor. Napětí na kondenzátoru rychle klesá, při určité rychlosti může dosáhnout rezonanční frekvence, vybijí se naráz a rotor se okamžitě zabrzdí. Současně vzniká přepětíový ráz několikanásobku U_n , který ohrožuje motor i kondenzátor, mechanický náraz namáhá vinutí a hřídel motoru. Tato situace vzniká při podsynchronních kritických otáčkách, přepětí vlivem samobuzení vniká však již v okamžiku vypnutí motoru. Velkým nebezpečím je opětné připnutí dobíhajícího motoru k síti, kdy je velká pravděpodobnost nesouhlasu fází mezi napětím sítě a napětím od samobuzení. Volbou velikosti kondenzátoru na 55% jmenovitého jalového výkonu motoru (při jmenovitém zatížení na $\cos\varphi = 1$), tj. asi 90% magnetizačního výkonu při chodu naprázdno, nevzniká na svorkách motoru téměř žádné napětí a je vyloučeno samobuzení. Vyloučení samobuzení při provozování asynchronních generátorů je nutno zajistit okamžitým odepnutím kondenzátorů při odpojení generátoru od sítě.

2.8.4 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita znamená schopnost elektrického zařízení pracovat bez závad v prostředí, kdy kromě žádaných elektrických veličin (napětí, proudů, signálů, ...) do něj vstupují i signály nežádoucí, rušivé. Současně však může toto zařízení nadměrně ovlivňovat své okolí nežádoucími elektrickými jevy (vyzařováním elektromagnetického pole apod.) Kompatibilita (slučitelnost) elektrických obvodů a sítí byla v minulosti v různém rozsahu řešena na úrovni národních předpisů. V současné době se do systému norem ČSN přebírají mezinárodní normy (IEC) a evropské normy (EN), většinou přímým překladem. Výčet těchto norem je nad rámec tohoto referátu, je zde uvedeno pouze informativní členění norem řady IEC 1000 a v příloze výběr nejdůležitějších článků z normy ČSN EN 6100-2-4 (Kompatibilní úrovně pro nf rušení šířené vedením v průmysl. závodech).

V zemích EU platí od 1.1.1995 zákon, který řeší připojovací podmínky spotřebičů k elektrické síti a nedovolí připojit spotřebiče, které na ni mají zpětný vliv – tzn. jsou zdrojem harmonických. Veškeré statické kompenzátory musí mít předřazenou ochrannou tlumivku. V normě ČSN 33 3430, případně ČSN EN 50 160 jsou uvedeny mezní hodnoty jednotlivých vyšších harmonických a celkového zkreslení sinusové křivky napětí na jednotlivých úrovních napětíových hladin.

ČSN EN 61000-2-4 Elektromagnetická kompatibilita (eqv. IEC 1000-2-4) (EMCOS s.r.o)

Oddíl 4: Kompatibilní úrovně pro nf rušení šířené vedením v průmysl. závodech

Tato norma se týká dodávky elektrické energie NN a VN o kmitočtu 50/60Hz, dále se zabývá odchylkami parametrů napětí, které mohou být očekávány v napájecím bodě uvnitř závodu (IPC) v průmyslových a jiných neveřejných sítích. Kompatibilní úrovně jsou uvedeny pro různé třídy elektromagnetického prostředí.

Definice:

· **elektromagnetická kompatibilita (EMC)** znamená schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení čehokoliv v tomto prostředí

- **elektromagnetická kompatibilní úroveň** – předepsaná maximální úroveň elektromagnetického rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje, zařízení nebo systémy provozované v konkrétních podmínkách
- **celková úroveň rušení** - úroveň daného elektromagnetického rušení způsobeného superpozicí emisí ze všech jednotlivých zařízení dané sítě
- **napájecí bod (PC)** – bod, v kterém má být vzata v úvahu EMC
- **společný napájecí bod (PCC)** – bod veřejné rozvodné el. sítě, ve kterém je nebo má být připojena vyšetřovaná síť
- **napájecí bod uvnitř závodu (IPC)** – napájecí bod uvnitř vyšetřované sítě nebo instalace

Třídy elektromagnetického prostředí:

- **Třída 1** se týká chráněných napájení a má kompatibilní úrovně nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě. To se týká zařízení velmi citlivého na rušení v rozvodné síti (např. přístrojové vybavení laboratoří, některých ochranných a automatizačních zařízení, počítačů atd.- obecně se jedná o zařízení napájené z UPS).
 - **Třída 2** se týká bodů PCC a IPC všeobecně v průmyslovém prostředí. Kompatibilní úrovně jsou identické s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě, proto v této třídě mohou být navrhovány prvky pro použití ve veřejných rozvodných sítích.
 - **Třída 3** se týká jenom bodů IPC v průmyslovém prostředí. Tato třída má pro některé jevy rušení vyšší kompatibilní úrovně než *třída 2* a měla by se uvažovat např. je-li splněna jakákoliv z těchto podmínek a převážná část zátěže je napájena přes měniče o jsou provozovány svářečky (svařovací lisy, bodovky) o velké motory jsou často rozbíhány o zatížení se rychle (impulzně) mění
- Napájení velmi rušících zařízení (obloukové pece, velké měniče ap., „drsné“ prostředí) je nutné z vyčleněných přípojnic (samostatný transformátor); úrovně rušení překračují často *třidu 3* a je nutné kompatibilní úrovně rušení odsouhlasit. Kondenzátory pro kompenzaci účinníku by se měly připojovat k IPC *třídy 3* vždy přes sériové reaktory; kde však byla jasně prokázána nepřítomnost rezonančních účinků a hodnoty harmonických vyšších řádů jsou mnohem menší než hodnoty dané pro *třidu 3* nemusí být sériové reaktory nezbytné, nutná je kontrola po aplikaci nehrazeného kompenzátoru.

Kompatibilní úrovně (ČSN EN 61000-2-4)

<i>Rušení</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
Změny napětí, odchylky od jmen. napětí U_n ; $\Delta U / U_n$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	+10 až +15%
Poklesy napětí, odchylky od jmen. napětí U_n ; $\Delta U / U_a$	10 až 100%	10 až 100%	10 až 100%
Δt [půlperiody]	1	1 až 300	1 až 300
Krátkodobá přerušení [s]	žádné	-	≤ 60
Nesymetrie napětí $\Delta U_{neg} / U_{pos}$	2%	2%	3%
Odchylky kmitočtu sítě $\Delta f / f_n$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$

Kompatibilní úrovně pro harmonické

<i>Rušení</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
Celkové harmonické zkreslení napětí (THD)	5%	8%	10%

Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí U_h

<i>Rád harmonické</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
<i>lichého řádu – mimo násobky 3</i>	[%]	[%]	[%]
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	5x√(11/h)
<i>lichého řádu – násobky 3</i>	[%]	[%]	[%]
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	2
21	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	1
<i>sudého řádu</i>	[%]	[%]	[%]
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
>10	0,2	0,2	1

Faktory ovlivňující životnost výkonových kondenzátorů:

- přehřátí kondenzátorů – tato skutečnost je množstvím výrobců podceňována, zdrojem problému může být jak nedostatečné dimenzování nebo porucha ventilátoru, tak i relativně vysoké teploty vzduchu v rozvodnách
- problémy s harmonickými – konstrukce kondenzátoru povoluje limitovanou marginální změnu napětí na svitku (derivaci) během připojení kondenzátoru k síti. V případě sinusových průběhů je tato podmínka dodržena, toto však neplatí v případě, pokud je

průběh odebíraného proudu zátěže znečištěn komutačními špičkami nebo obdélníkovými průběhy. V širokém povědomí jsou již jisté orientační hodnoty pro aplikaci tzv. hrazených kompenzací, problémy je však možné dokumentovat pouze pomocí měřidel kvality elektřiny. Jsou jevy, které působí problémy, i když běžné testy na celkové harmonické zkreslení je v pořádku

- přepětí, tranzientní jevy, výboje – dodržení štitkového napětí je základní podmínkou pro životnost kondenzátoru, přítomnost přepětí je pak rizikovým faktorem, zejména u kompenzací s tlumivkami, které zvyšuje napětí na kondenzátoru. Tranzientní výboje představují krátkodobý aspekt problému přepětí
- nevhodný regulátor – také algoritmus regulátoru, kterému „nesedl“ charakter průběhu jalového a činného výkonu v síti, může být příčinou nemalých obtíží. Jedná se zejména o různé cyklování, kompenzování na okamžitý účinník, problémy s dodržením vybíjecí pauzy apod. Kvalitní regulátory umožňují sledovat počty sepnutí jednotlivých stupňů a dobu sepnutí. Pokud se roční hodnoty sepnutí stupně pohybují kolem jednotek tisíc, je na místě patřičná pozornost - ověření vhodnosti skladby stupňů, návrh opatření apod.

3 Vliv a filtrování harmonických

Rozvoj moderní polovodičové techniky vedl ke zvýšení počtu nelineárních zátěží v sítích, které negativně ovlivňují napájení střídavým proudem, zejména výkonová elektronika jako pohony, usměrňovače, elektronické předřadníky a napájecí zdroje.

Typický nesinusový průběh napájecího proudu měniče je složen ze základní harmonické a množství harmonických vyšších řádů, které jsou celistvé násobky základní frekvence (především 5, 7, 11 a 13 řádu).

Významnou vlastností kondenzátorů je totiž frekvenční závislost jejich impedance. Kapacitní reaktance, která je jalovou složkou jejich impedance totiž klesá se zvyšujícím se kmitočtem. Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem se tedy vlivem harmonických vzroste (neboť pro ně bude představovat velmi nízkou impedanci) a tento proud pak bude přetěžovat nejenom samotný kondenzátor, ale i části sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem.

Nechráněné kompenzační sekce lze použít v takových sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů činí cca 10 až 15 %.

(EMCOS s.r.o)

Zkreslení vlivem harmonických může způsobit následující:

- Snížení životnosti kondenzátoru
- Zbytečné spínání jističů a dalších ochran
- Chybná funkce a poškození počítačů, pohonů, světelných obvodů a dalších citlivých spotřebičů

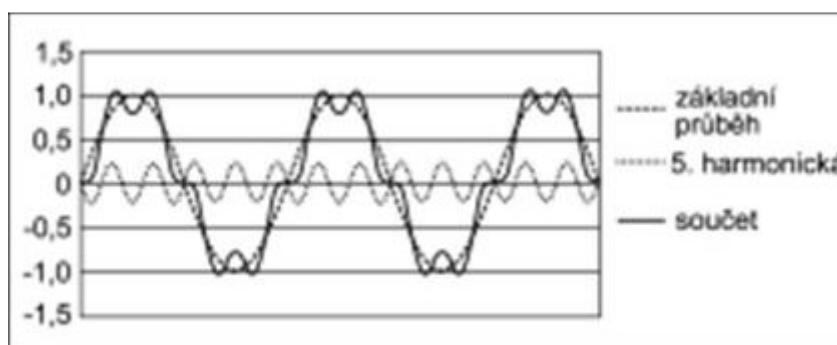
Indukčnost transformátoru společně s kondenzátory vytváří při jejich zapojování pro kompenzaci účinníku tzv. rezonanční obvod, který by mohl být vybuzen harmonickým proudem produkovaným zátěží. Tento rezonanční obvod má rezonanční frekvenci a pokud existuje harmonický proud blízko této frekvence, uvede se obvod do rezonančního stavu, kdy jím bude

procházet vysoký proud, který je bude přetěžovat a zvyšovat napětí v nich a celém zařízení, které je připojeno paralelně.

Kompenzace účinníku s odladěnou filtrací je metoda odstraňující nebezpečí vzniku rezonančního stavu pomocí posunu rezonanční frekvence na nižší hodnoty, kde se nenachází žádný harmonický proud. Toho se dosáhne tak, že se ke kondenzátorům zapojí filtrační tlumivka. Vzniklý obvod je sice nadále rezonanční, avšak jeho rezonanční frekvence je pod první existující harmonickou (zatlumena). Tak je zajištěno, že nevznikne skutečný rezonanční stav. Součásti chráněné sekce musí být vybrány s ohledem na tuto skutečnost, pokud jde o kondenzátory, po sériovém připojení tlumivky na nich bude větší napětí než síťové. Tlumivky musí vybrány s ohledem na hodnotu indukčnosti tak, aby byla získána potřebná ladící frekvence a schopnost vést proud dostatečná pro pohlcení harmonických.

Harmonické frekvence lze omezit třemi způsoby:

- **pasivním filtrem** – LC obvod je naladěn na harmonickou frekvenci, při které má minimální impedanci. Harmonické proudy se tak uzavírají přes tento obvod. Pasivní filtry se navrhují pro jednu dominantní harmonickou frekvenci. Pro více dominantních harmonických frekvencí je třeba navrhnout více laděných LC obvodů do jednoho zařízení. U malých zařízení lze pasivní filtry navrhovat jako širokopásmové. Toto řešení je jednoduché a finančně nejméně náročné.
- **izolačními transformátory** – s vinutím zapojeným do trojúhelníka se ve vinutí uzavírá 3. řád harmonické frekvence a tím tuto frekvenci izoluje od napájecí sítě. Při průchodu proudů 3. harmonické frekvence trojfázovou soustavou se tyto proudy sčítají ve středním pracovním vodiči a neúměrně ho tak zatěžují.
- **aktivní filtry** – proudovým transformátorem se měří obsah harmonických v proudu zátěže. Tento je přiveden do regulátoru aktivního filtru a pomocí generátoru proudu vytváří jeho kopii. Díky tomu je v následujícím cyklu přiveden do napájení s opačnou fází a harmonické proudy se odečtou. Z napájecí sítě je tak odebírán pouze proud 1. harmonické. V praxi je obsah harmonických proudů redukován až o 90%.



obr. 3. 1 Průběh harmonické

Aktivní filtry harmonických

Užití

- Pro průmyslové sítě s vyšším podílem usměrňovačů - řízení pohonů
- Ke kompenzaci měničů - řízení třífázových pohonů velkých výkonů s nízkou spotřebou jalového výkonu
- Pro nízkonapěťové rozvody s přístroji výpočetní techniky a úspornými žárovkami, způsobujícími 3. harmonickou a tím zvýšení průchodu proudu v nulovém vodiči

4 Rozbor stávajícího stavu v BC-MCHZ

Závod je napájen ze dvou nezávislých přírodních vedení a to z teplárny Ostrava a elektrárny Třebovice. V místě připojení jsou obě tyto vedení na hladině 110 kV. Z důvodů snížení velikosti zastavené plochy hlavní rozvodny byla řešena rozvodna jako zapouzďřená s izolačním plynem SF₆. Na vstupu do LDS je instalován transformátor o jmenovitém výkonu S = 5000MVA.

Schéma napájení závodu BC-MCHZ a napojení LDS na distribuční soustavu viz. příloha č.1.

4.1 Rozložení zdrojů kompenzace

Pochůzkou jsme zjišťovali rozmístění jednotlivých spotřebičů jalového výkonu a způsoby kompenzace takových spotřebičů. Jednotlivé provozy mají vždy na vstupu instalovanou podružnou rozvodnu, kde jsou také umístěny kompenzační rozváděče požadovaného výkonu. V příloze č. 2 jsou uvedeny všechny instalované kompenzační rozváděče v závodu. Tyto rozváděče jsou osazeny kondenzátorovými bateriemi s předřazenými tlumivkami a jejich regulace spočívá ve spínání a vypínání jednotlivých skupin kondenzátorů pomocí speciálních stykačů k tomu určených. Jako měřicí a řídicí přístroj pro zjišťování parametrů v síti slouží regulátor jalového výkonu. Tento přístroj má za úkol připínat a odpínat jednotlivé skupiny kondenzátorových baterií v závislosti na velikosti požadovaného výkonu.

V průmyslových rozvodech se kompenzace jalového výkonu provádí nejlépe v místě spotřeby jalového výkonu, z důvodů odlehčení přírodních vedení o jalovou složku výkonu.

Pro velké dodávky jalové energie se používá synchronních strojů. Kompenzaci je nutné provést také u podružných transformátorových stanic, kde prostředky ke kompenzaci se zapojí na sekundární stranu transformátoru. Ve výrobnách se také používá smíšená kompenzace, kde jsou stroje částečně vykompenzovány jak v místech spotřeby, tak v podružných rozváděcích určených pro skupinovou kompenzaci.

V našem případě, velké spotřebiče jalového výkonu, jako jsou synchronní turbokompresory, jsou efektivně vykompenzovány pomocí regulace buzení, a tudíž není potřebná další jejich kompenzace, jak je vidět z následujícího měření na těchto strojích.

Dále mezi kritické místa z důvodů spotřeby jalového výkonu patří chladicí věže, protože zde není instalováno žádné kompenzační zařízení. Pouze v jednom místě instalace těchto zařízení se nacházejí kompenzační prostředky, a proto ve dvou dalších případech jsme provedli měření, abychom zjistili, zda je potřebná nějaká další kompenzace jalového výkonu popř. doplněná filtrací harmonických.

4.2 Měření odběru LDS při chodu synchronních strojů

V chemických závodech BorsodChem MCHZ jsou nainstalovány celkem čtyři velké synchronní elektromotory sloužící pro výrobu stlačeného vzduchu. Zajímalo nás, jaký mají vliv

na lokální distribuční soustavu v případě při chodu všech synchronních motorů, až po omezení výroby, kdy byly odstaveny všechny synchronní stroje. Ze systému kontroly bylo sejmuto půlhodinové měření pro každý případ odběru vždy po 150 vzorcích. Výsledky měření s jednotlivými parametry při různých úrovních odběru, můžeme vidět v grafech uvedených v příloze. Pro kontrolu jsem provedl výpočet účinníku z celkové spotřeby jak z činné tak jalové složky spotřebovaného výkonu za celkovou dobu měření

Byly měřeny tyto situace:

- Odběr LDS při chodu všech synchronních strojů TK(KD6,KD7,TD1,TD2)
- Odběr LDS při chodu všech synchronních strojů mimo TK KD7
- Odběr LDS při chodu všech synchronních strojů mimo TK (KD7, KD6)
- Odběr LDS bez chodu všech synchronních strojů TK(KD6,KD7,TD1,TD2)

Parametry jednotlivých strojů:

TK KD6 - Synchronní elektromotor turbokompresoru výroby KD6 - 2,2 MW / 6 kV

TK KD7 - Synchronní elektromotor turbokompresoru výroby KD7 - 2,4 MW / 6 kV

TK FD1 - Synchronní elektromotor turbokompresoru výroby FD1 - 1,0 MW / 6 kV

TK FD2 - Synchronní elektromotor turbokompresoru výroby FD2 - 1,0 MW / 6 kV

Výpočet účinníku při různých úrovních odběru:

- *provoz se všemi synchronními elektromotory*

Průměrná spotřeba činné energie v průběhu našeho měření činí $P = 13,78 \text{ MW} \cdot \text{h}^{-1}$ a jalové energie $Q = 0,756 \text{ MVar} \cdot \text{h}^{-1}$

Střední hodnotu účinníku vypočítáme

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,756}{13,78}\right)^2 + 1}} = 0,9985$$

- *provoz bez KD7*

Průměrná spotřeba činné energie v průběhu našeho měření činí $P = 10,84 \text{ MW} \cdot \text{h}^{-1}$ a jalové energie $Q = 0,673 \text{ MVar} \cdot \text{h}^{-1}$

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,673}{10,84}\right)^2 + 1}} = 0,9981$$

- provoz bez KD6 a KD7

Průměrná spotřeba činné energie v průběhu našeho měření činí $P = 8,59 \text{ MW}\cdot\text{h}^{-1}$ a jalové energie $Q = 0,712 \text{ MVar}\cdot\text{h}^{-1}$

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,712}{8,59}\right)^2 + 1}} = 0,9966$$

- provoz bez synchronních motorů

Průměrná spotřeba činné energie v průběhu našeho měření činí $P = 5,76 \text{ MW}\cdot\text{h}^{-1}$ a jalové energie $Q = 0,375 \text{ MVar}\cdot\text{h}^{-1}$

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,375}{5,76}\right)^2 + 1}} = 0,9978$$

Grafy naměřených hodnot: viz. Příloha č.3-4

Zhodnocení měření:

Jak je vidět z grafu naměřených hodnot, v současné době není potřebná další kompenzace jalového výkonu. Hodnota měřeného účinníku jak při plném zatížení tak při odstavení některých velkých elektromotorů se drží v předepsaných hodnotách, které jsou uvedeny v připojovacích podmínkách lokální distribuční soustavy. A dále také změny dodávaného činného výkonu neovlivňují velikost napětí.

4.3 Měření spotřebičů síťovým analyzátozem

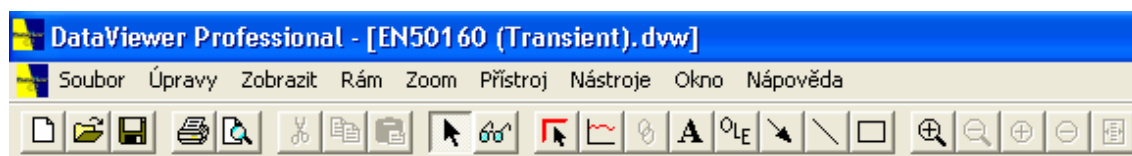
Měření bylo provedeno pomocí inteligentního analyzátoru elektrických sítí QUALISTAR 8334 firmy Chauvin Arnoux. Tento analyzátor slouží k získávání rychlého obrazu o zásadních charakteristikách jednofázových, dvoufázových a třífázových střídavých a stejnosměrných elektrických sítí. Přístroj kromě naměřených hodnot předkládá i hodnoty vypočtené, vše v souladu s normami EN.



obr.4. 1 Síťový analyzátor Qualistar 8334

Tento analyzátor slouží k získávání rychlého obrazu o zásadních charakteristikách jednofázových, dvoufázových a třífázových střídavých a stejnosměrných elektrických sítí. Přístroj kromě naměřených hodnot předkládá i hodnoty vypočtené, vše v souladu s normami EN 50160, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7. Je určen dodavatelům a odběratelům elektrické energie, pracovníkům údržby elektrických zařízení atd. Přístroj je vybaven přehledným barevným displejem. Napájen je z vestaveného akumulátoru nebo ze sítě 230 a 110 V. Uživatel velmi snadno a rychle ovládá přístroj a nastavuje jeho parametry prostřednictvím symbolu (ikon), které se objeví na displeji při spuštění přístroje.

Aby bylo možné získat a zpracovávat naměřená data je nutné mít program Data Viewer Professional, dodávaný výrobcem tohoto měřicího přístroje.



obr.4. 2 Menu programu Data Viewer

4.3.1 Vlastní měření

Jako nejkritičtější místa z důvodů možnosti odběru se špatným účínkem nebo případným vznikem harmonických se nám jeví chladicí věže a to ve dvou úsecích závodu. Měření jsme prováděli v dopoledních hodinách za plného provozu výroby. Abychom analyzovali celkový odběr tohoto spotřebiče bylo nutné připojit síťový analyzátor na příводы

hlavního rozváděče. Přístroj jsme nastavili tak, aby snímal jednotlivé vzorky po 1 s po dobu 5 minut. V tabulce naměřených hodnot jsou uvedeny pouze průměrné hodnoty z celkové doby měření.

Soupis měřených spotřebičů a jejich parametry u prvního měření chladicích věží:

P.č.	Výkon	Název	Otáčky	Poznámka
	[kW]		[ot./min.]	
1.	250	Čerpadlo	1485	
2.	250	Čerpadlo	1485	
3.	90	Čerpadlo	1485	
4.	90	Čerpadlo	1485	
5.	37/ 9	Ventilátor	1475/735	Dvouotáčkové Dahlanderovozapojení 42/ 11,5 kW
6.	37	Ventilátor	1475/735	Dvouotáčkové Dahlanderovozapojení 37/ 9 kW
7.	37	Ventilátor	1475/735	Dvouotáčkové Dahlanderovozapojení 37/ 9 kW
8.	37	Ventilátor	1475/735	Dvouotáčkové Dahlanderovozapojení 37/ 9 kW

Soupis měřených spotřebičů a jejich parametry u druhého měření chladicích věží:

P.č.	Výkon	Název	Otáčky	Poznámka
	[kW]		[ot./min.]	
1.	40	ventilátor chladicí věže č.1	975	REC
2.	40	ventilátor chladicí věže č.2	975	REC
3.	40	ventilátor chladicí věže č.3	975	REC
4.	40	ventilátor chladicí věže č.4	975	REC
5.	45/6	ventilátor chladicí věže č.5	180/90	motor uvnitř chlad.věže
6.	45/6	ventilátor chladicí věže č.6	180/90	motor uvnitř chlad.věže
7.	40	ventilátor chladicí věže č.7	975	REC



obr.4. 3 Snímek chladících věží

Naměřené hodnoty:

1. Frekvence – je to celosystémový parametr — odchylky v tabulce jsou způsobeny různou dobou měření.

	Chladící věže - měření 1	Chladící věže - měření 2	Jednotka
Hz	50	50	Hz

2. Efektivní hodnota fázových napětí (RMS)

	Chladící věže - měření 1	Chladící věže - měření 2	Jednotka
Vrms L1	228,4	231,3	V
Vrms L2	229	230,9	V
Vrms L3	228,9	231,6	V

3. Efektivní hodnota sdružených napětí (RMS)

	Chladící věže - měření 1	Chladící věže - měření 2	Jednotka
Urms L1	396	399,8	V
Urms L2	397,1	400,9	V
Urms L3	395,6	401,2	V

4. Efektivní hodnota proudu ve fázích (RMS)

	Chladící věže - měření 1	Chladící věže - měření 2	Jednotka
--	--------------------------	--------------------------	----------

Arms L1	722,7	98,9	A
Arms L2	774,1	99,5	A
Arms L3	732,8	99,2	A

5. Cinitel celkového harmonického zkreslení pro fázové napětí

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Uthd L1	0,393	0,477	%
Uthd L2	0,546	0,644	%
Uthd L3	0,476	0,874	%

6. Cinitel celkového harmonického zkreslení pro sdružené napětí

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Vthd L1	0,361	0,703	%
Vthd L2	0,415	0,318	%
Vthd L3	0,501	0,798	%

7. Cinitel celkového harmonického zkreslení pro fázové proudy

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Athd L1	1,42	0,508	%
Athd L2	1,307	0,509	%
Athd L3	1,243	0,584	%

8. Crest factor – tzv. "Činitel výkyvu" – a je to poměr udávající podíl mezi špičkovou a efektivní hodnotou

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Ucf L1	1,41	1,41	
Ucf L2	1,42	1,4	
Ucf L3	1,42	1,4	
Vcf L1	1,4	1,41	
Vcf L2	1,4	1,41	
Vcf L3	1,4	1,41	
Vcf L1	1,42	1,43	
Vcf L2	1,41	1,45	
Vcf L3	1,44	1,48	

9. Voltage, Current unbalance – nesymetrie napětí a proudu

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Vunb	0,2	0,18	%
Aunb	3,95	0,69	%

10. Flicker (Flikr) Voltage – rychlé periodické změny napětí

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Vflik L1	0,316	0,223	
Vflik L2	0,322	0,184	
Vflik L3	0,321	0,192	

11. K - faktor – vyjadřuje jakým poměrem se harmonické zkreslení podílí na tepelných účincích na napájecí zdroj (transformátor)

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
Akf L1	1,008	1	
Akf L2	1,002	1	
Akf L3	1	1	

12. Power factor – Celkový účinník

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
PF L1	0,855	0,582	
PF L2	0,834	0,573	
PF L3	0,82	0,564	

13. Displacement Power factor – Účinník vztažený pouze na základní harmonickou.

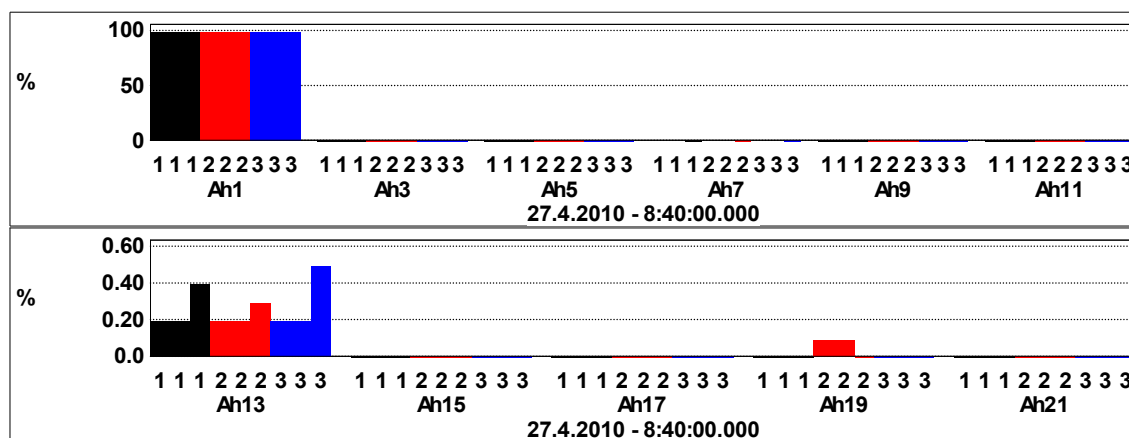
	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
DPF L1	0,855	0,583	
DPF L2	0,834	0,573	
DPF L3	0,82	0,565	

14. Okamžité hodnoty činného, jalového a zdánlivého výkonu

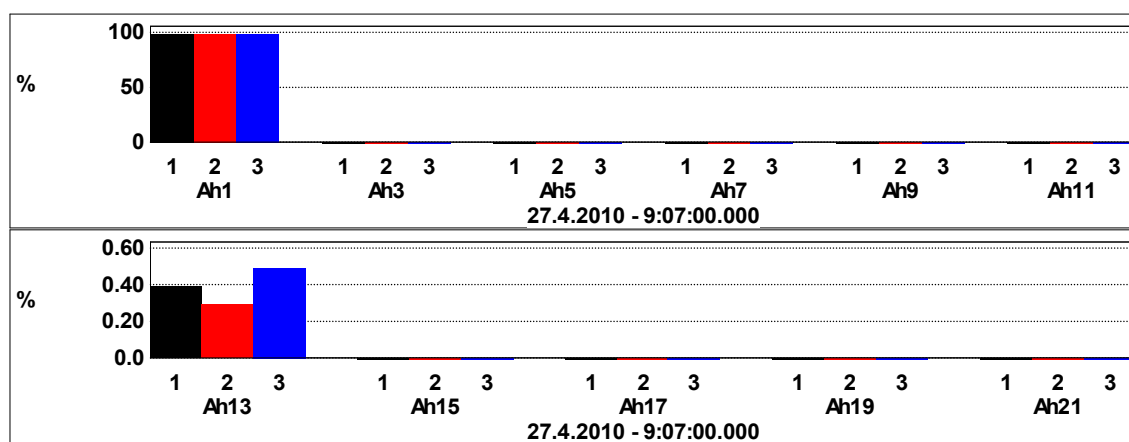
	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
	1	2	

W L1	141204	13345	W
W L2	147948	13175	W
W L3	137648	12962	W
W sum	426801	39484	W
VAr L1	85542	18607	VAr
VAr L2	97760	18826	VAr
VAr L3	95878	18978	VAr
VAr sum	279180	56413	VAr
VA L1	165094	22898	VA
VA L2	177330	22979	VA
VA L3	167749	22983	VA
VA sum	510174	68861	VA

Obsah harmonických z prvního měřeného úseku:

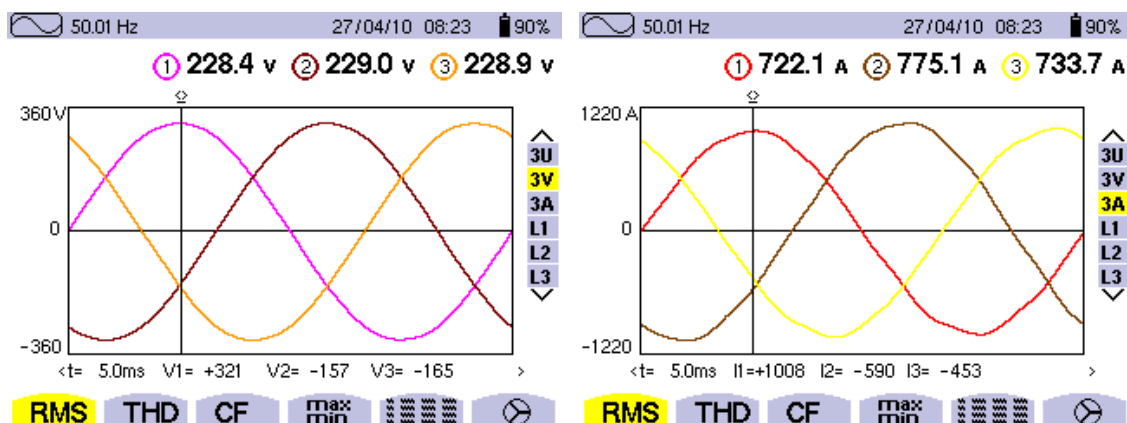


Obsah harmonických z druhého měřeného úseku:

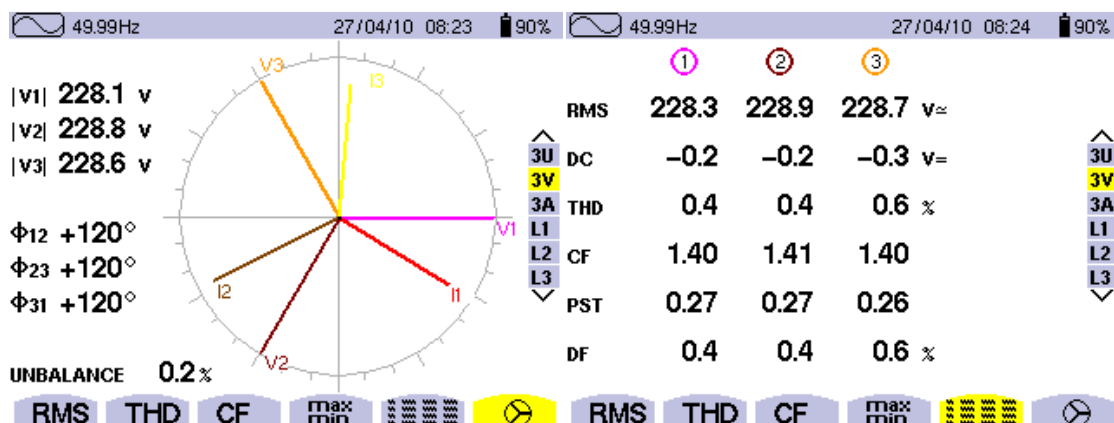


Všechny hodnoty byly vyčteny a převedeny z vyhodnocených záznamu (trendu) vytvořených z dat přístroje Qualistar v programu Data Viewer Professional. Přístroj je schopen graficky zaznamenat všechny průběhy a uložit je jako obrázek.

Průběh fázového napětí a proudu:



Fázový posuv napětí a proudu a výsledná tabulka odchylek pro napětí:



Kompletní zpracované záznamy pro každou měřenou oblast obsahují grafy a hodnoty pro každou veličinu a to jak průměr (avg) tak také minimum a maximum za daný časový interval. Každý takový protokol o měření obsahuje celkem osmnáct stran záznamu. Všechny protokoly naleznete v příloze na médiu CD.

Zhodnocení měření:

Analýza stávajících rozvodu byla provedena pomocí zmapování celého rozvodu a následným zjištěním nejproblematictějších nekompenzovaných míst. Záznamy z analýzy byly velmi obšírné a velmi by navýšily objem této diplomové práce. Proto jsou zde vyňaty a publikovány jen části, které jsou podstatné a upřesňující dané téma. Měření provedené pomocí analyzátoru sítě Qualistar firmy Chauvin Arnoux přinesla důležité záznamy, které jsme museli zpracovat a vyhodnotit.

Měřicí přístroj Qualistar je velmi kvalitní přístroj umožňující pomocí FFT okamžité výsledky z měření. Jeho další výhodou je, že umí snadno komunikovat s počítačem.

Z výše uvedených měření je vidět z tabulek naměřených hodnot, že účinník těchto odběrů vychází hlavně u druhého měření dosti špatný. Z obou měření spočítám potřebný kompenzační výkon pro regulaci při různém zatížení, aby byla dosažena hodnota účinníku $\cos \varphi = 0,95$.

Dále spotřebiče nezatěžují síť o další řády harmonických pouze se objevuje 13. a 19.

harmonická ale jak je vidět výše v grafech z měření jsou tyto hodnoty zanedbatelné, a proto není nutné použít filtraci harmonických.

4.3.2 Výpočet kompenzace měřených chladících věží na účinník $\cos \varphi = 0,95$ ind.

Kompenzační výkon potřebný k dosažení požadovaného účinníku se vypočte podle vztahu:

$$Q_K = Q_1 - Q_2 = P \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \quad (\text{VAR; W, -, -}) \quad (52)$$

Naměřené hodnoty účinníku:

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
PF L1	0,855	0,582	
PF L2	0,834	0,573	
PF L3	0,82	0,564	

Naměřené hodnoty výkonů:

	Chladicí věže - měření 1	Chladicí věže - měření 2	Jednotka
W L1	141204	13345	W
W L2	147948	13175	W
W L3	137648	12962	W
W sum	426801	39484	W

Potřebný jalový kompenzační výkon u prvních chladících věží:

Návrh kondenzátorové baterie pro paralelní centrální kompenzaci v provozu kde jsou instalovány chladicí věže s motory čerpadel o výkonu od 90 až po 250 kW s účinníkem

$\cos \varphi = 0,85$ a motory ventilátorů o výkonu od 9 až po 42 kW při účinníku $\cos \varphi = 0,81$ a $0,56$ (liší se z důvodu dvouotáčkového motorů).

Pro měřený okamžitý odběr:

$$P = 426,801 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,85 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_1 = 0,619$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

Z naměřené hodnoty činného výkonu určíme potřebný kompenzační výkon

$$Q_K = 426801 (0,619 - 0,328) = 124,19 \text{ kVAr}$$

Potřebný jalový kompenzační výkon stanovený z hodnot výkonu a účinníku udávaný výrobcem určíme z výpočtu:

Výpočet při maximálním odběru motorů v chladících věžích:

$$P_{\Sigma} = 680 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,85 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_1 = 0,619$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{K\Sigma} = 680000 (0,619 - 0,328) = 198,386 \text{ kVAr}$$

$$P_v = 153 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,81 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_1 = 0,723$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{Kv} = 153000 (0,723 - 0,328) = 268,6 \text{ kVAr}$$

$$Q_c = Q_{K\Sigma} + Q_{Kv} = 198,386 + 268,6 = 466,9 \text{ kVAr}$$

Při maximálním chodu chladících věží je nutno vykompenzovat hodnotu jalové složky

$$Q_{\max} = 466,9 \text{ kVAr}$$

Výpočet při minimálnímu odběru motorů v chladících věžích:

$$P_{\Sigma} = 90 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,85 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_1 = 0,619$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{K\Sigma} = 90000 (0,619 - 0,328) = 26,190 \text{ kVAr}$$

$$P_v = 9 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,56 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_1 = 1,479$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \quad \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{Kv} = 9000 (1,479 - 0,328) = 10,363 \text{ kVAr}$$

$$Q_c = Q_{Kc} + Q_{Kv} = 26,190 + 10,363 = 36,5 \text{ kVAr}$$

Při minimálním chodu chladících věží je nutno vykompenzovat hodnotu jalové složky

$$Q_{\min} = 36,5 \text{ kVAr}$$

Potřebný regulační jalový výkon pak bude:

$$Q_{\max} - Q_{\min} =) Q_{\text{reg}} = \mathbf{430,4 \text{ kVAr}}$$

Výpočet kapacity kondenzátoru při zapojení do trojúhelníka:

Určíme velikost kapacitního jalového výkonu

$$I_{bc} = \frac{Q}{U} = \frac{430400}{400} = 1076 \text{ A}$$

kapacitní jalový odpor

$$X_c = \frac{U}{I_{bc}} = \frac{400}{1076} = 0,371 \Omega$$

A pak kapacita kondenzátoru bude

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{2\pi 50 \cdot 0,371} = 8563 \mu F$$

Potřebný jalový kompenzační výkon u druhých chladících věží:

Návrh kondenzátorové baterie pro paralelní centrální kompenzaci v provozu kde jsou instalovány chladicí věže s motory ventilátorů o výkonu od 6 až po 45 kW s účinníkem $\cos \varphi = 0,69$.

Pro měřený okamžitý odběr:

$$P = 39,484 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,573 \quad \text{tg } \varphi_1 = 1,430$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

Z naměřené hodnoty činného výkonu určíme potřebný kompenzační výkon

$$Q_K = 39484 (1,43 - 0,328) = 43,511 \text{ kVAr}$$

Potřebný jalový kompenzační výkon stanovený z hodnot výkonu a účinníku udávaný výrobcem určíme z výpočtu:

Výpočet při maximálním odběru motorů v chladících věžích:

$$P_v = 290 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,69 \quad \text{tg } \varphi_1 = 1,048$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{Kv} = 290000 (1,048 - 0,328) = 209,089 \text{ kVAr}$$

Při maximálním chodu chladících věží je nutno vykompenzovat hodnotu jalové složky

$$Q_{\max} = 209,089 \text{ kVAr}$$

$$P_v = 6 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,69 \quad \text{tg } \varphi_1 = 1,048$$

$$\cos \varphi_K = 0,95 \quad \text{tg } \varphi_2 = 0,328$$

$$Q_{Kv} = 6000 (1,048 - 0,328) = 4,32 \text{ kVAr}$$

Při minimálním chodu chladících věží je nutno vykompenzovat hodnotu jalové složky

$$Q_{\min} = 4,32 \text{ kVAr}$$

Potřebný regulační jalový výkon pak bude:

$$Q_{\max} - Q_{\min} =) Q_{\text{reg}} = \mathbf{204,769 \text{ kVAr}}$$

Výpočet kapacity kondenzátoru při zapojení do trojúhelníka:

Určíme velikost kapacitního jalového výkonu

$$I_{bc} = \frac{Q}{U} = \frac{204769}{400} = 511,9 \text{ A}$$

Kapacitní jalový odpor

$$X_c = \frac{U}{I_{bc}} = \frac{400}{511,9} = 0,781 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{2\pi 50 \cdot 0,781} = 4075 \mu F$$

Zhodnocení výpočtu:

Výpočtem jsem zjistil, že pro udržení co nejlepšího účinníku je potřeba regulovat jalový výkon kompenzačních prostředků při každé změně zatížení. Pro velikost regulačního jalového výkonu Q_{REG} vycházíme z rozdílu Q_{\min} tj. při chodu jednoho motoru a z Q_{\max} tj. při chodu všech motorů. Z této hodnoty pak stanovujeme počet regulačních stupňů a výkon jednotlivých kondenzátorů.

V dnešní době je v útlumu řešení kompenzace v průmyslových objektech volbou rotačních kompenzátorů z důvodu velké spotřeby činné energie a dobou odezvy na změnu dodávky jalové energie. A proto navrhuji použít filtračně kompenzační rozváděč navržený pro skupinovou kompenzaci na hladině napětí 6 kV jak bývá řešen rozvod elektrické energie v průmyslových objektech. Použití kombinovaného, filtračně-kompenzačního zařízení, odstraňuje riziko rezonance a zajišťuje oslabení harmonických, které spadají do rozsahu filtru.

Návrh rozváděče pro hladiny nízkého napětí

Kondenzátory jsou na síť připínány pomocí speciálních stykačů s vysokou životností. Přechodný děj je částečně zatlumen vzduchovým reaktorem, zařazeným do silového obvodu, není použita ochrana proti harmonickým složkám. Spínání je řízeno vlastním regulátorem nebo nadřazeným řídicím systémem. Pro zvýšení rychlosti regulace je možno instalovat rychlovybíjecí zařízení. Kompenzační rozváděč může být vybaven poruchovým systémem (tlak kondenzátorů, teplota, výpadek pojistky atd.).

Celým rozváděčem prochází přípojnicový systém zajišťující propojení jednotlivých částí.

Celkový kompenzační výkon je rozdělen do několika stupňů, každý z nich představuje část kompenzace a je navržen tak, aby nedocházelo buď k překompenzování a co možno přesnému doladění požadované kompenzace. Velikost jednoho stupně se volí přibližně 10 až 15% z celkového instalovaného výkonu.

V případě navýšení spotřeby jalové energie je možnost doplnění o další kondenzátorové baterie.

Kompaktní filtračně-kompenzační rozváděče NN

Parametry

- napěťová soustava 3NPE AC 50Hz 400/230V TN-C-S
- ochrana před náhodným dotykem automatickým odpojením od zdroje
- činitel zatlumení tlumivek 7% (rezonanční kmitočet LC obvodu 189Hz) nebo 14% (rezonanční kmitočet LC obvodu 134Hz)
- jmenovité napětí kondenzátorů $U = 440V$
- proudový obvod regulátoru X/5A (max. spotřeba 1VA)
- krytí rozváděče IP40
- celkový ztrátový výkon 5 - 7W/kVAr
- celkové harm. zkreslení napětí THD < 10%

Kompaktní filtračně-kompenzační rozváděče VN (6kV)

Jednotlivé stupně se skládají z těchto součástí:

-výkonové pojistky příslušné proudové hodnoty-jsou to speciální pojistky, které chrání zařízení jednoho kompenzačního stupně před zkratem a které jsou odolné proti krátkodobým spínacím nadproudům

-vakuové stykače se zhášedly a zvětšeným zdvihem kontaktů-určen především ke spínání kapacitních proudů

-trojfázová železová filtrační tlumivka- typ tlumivky se řídí velikostí kompenzačního výkonu a dále jsou opatřeny ochranným kontaktním teplotním čidlem
 -trojice jednofázových kondenzátorů spojených do trojúhelníka - jsou opatřeny pojistkami svitků, vestavěnými vybíjecími odpory a tlakovým pojistným spínačem.

5 Kapacita kabelových vedení

Vliv kapacity na přenos

Při vysokých napětích se silně projevuje kapacita vedení, která vyvolá velké nabíjecí proudy a výkony, které mají vliv na přenos.

Nabíjecí proud vedení:

$$I_{NAB} = I_C = 2\pi \cdot f \cdot C_K \cdot l \cdot U_f \cdot 10^{-6} \quad (\text{A; Hz, } \mu\text{H.km}^{-1}, \text{ km, V}) \quad (53)$$

$$\text{Vedení: } Q = 3 \cdot U_f \cdot I_{NAB} = \sqrt{3} U_S \cdot I_{NAB} \quad (\text{VAR; V, A}) \quad (54)$$

Kapacitní nabíjecí proud, který je k induktivní složce v protifázi působí příznivě a tuto složku kompenzuje. Vedení vvn a zvn se chová vlastně jako kondenzátor, který kompenzuje jalový induktivní výkon. Při chodu naprázdno však kapacitní proud působí škodlivě, neboť způsobuje přepětí --) Ferrantiův jev.

5.1 Řešení kapacity kabelového vedení v LDS

Parametry kabelu:

kabel typu: SILEC – SILEYTHENE 3x1x240 ALU PE 110kV

délka kabelu: 1 700 m

$C = 0,125 \mu\text{F/km}$

$R = 0,121 \text{ ohm/km}$

$R_{izo} \text{ při } 20^\circ\text{C} = 1 \cdot 10^5 \text{ M}\Omega/\text{km}$



obr. 5. 1 Řez kabelu

Kapacitní proud vypočítáme:

$$I_{NAB} = I_C = 2\pi \cdot f \cdot C_K \cdot l \cdot U_f \cdot 10^{-6}$$

$$I_{NAB} = I_C = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,125 \cdot 1,7 \cdot 63508 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{NAB} = 4,239A$$

pro celkový výkon vedení pak dostaneme

$$Q = \sqrt{3}U_s \cdot I_{NAB}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot 110000 \cdot 4,239 = 807,6 \text{ kVAr}$$

Tento jev vzniká u dlouhých vedení (vvn, zvn), která jsou provozována naprázdno, nebo s velmi malým zatížením. Vedením protéká ryze kapacitní nabíjecí proud. Důsledkem je, že napětí na konci vedení je vyšší než napětí na začátku vedení. Z důvodů vysoké hladiny napětí prochází kabelem značný jalový výkon avšak ten se snižuje pokud bude vedení více zatěžováno.

6 Závěrečné zhodnocení

V této diplomové práci jsem teoreticky popsal kompenzaci jalového výkonu a v případech, kde dochází ke vzniku harmonických vlivem elektronických systému v rozvodech, je zde uveden také rozbor filtrace harmonických. Dodávka jalové složky výkonu nebo vznik harmonických v sítích jsou nežádoucí, protože mají velký vliv na kvalitu elektrické energie. A také jsou odběratelé finančně penalizováni za nedodržení těchto parametrů v určitých mezích stanovených v připojovacích podmínkách pro velké odběratele. V dalších kapitolách jsem provedl rozbor stávajícího stavu lokální distribuční soustavy a možnosti jejího dalšího řešení do budoucna v případě navyšování výkonu.

Potlačení dominantních harmonických společně s kompenzací základního jalového výkonu vyžadují jen velmi málo úsilí a prostředků, navíc se kompenzace stejně provádí a většina dnešních kompenzátorů již zahrnuje hradící reaktory. V takovýchto systémech se v řadě případů přechází na naladění na rezonanční frekvence. Větší prospěch lze získat při návrhu s ohledem na rezonanci - harmonické proudy jsou efektivněji redukovány a riziko přetížení kompenzátoru není tak vysoké, jak se obecně předpokládá. Je však nutno instalovat jistou rezervu. To nepředstavuje problém, neboť přínosem je lepší filtrační efekt a lepší energetická účinnost při velmi nízkých dodatečných nákladech. Harmonické proudy způsobují distribuční síti větší problémy než jalové proudy a dá se tedy předpokládat, že dojde k zavedení poplatků za harmonické zkreslení, stejně tak jako za jalový výkon na základní frekvenci - nemá smysl žádat poplatky za základní jalový výkon a současně je nevyžadovat za harmonické. Neexistuje případ, kdy by instalace filtrů, s výjimkou filtrů instalovaných se zátěží nebo dokonce uvnitř zátěže, mohla být použita jako přesvědčivý argument pro selhání při dimenzování středních vodičů nebo špatného započítání vlivu harmonických při výběru kabeláže a dalšího vybavení. Je životně důležité udržovat nízkou impedanci systému, a to obzvláště v případech kdy jsou instalovány filtry. Jinak mohou být účinky filtrů nepříznivé.

Při bližším pohledu na současnou globální situaci v oblasti výroby, přenosu, rozvodu a spotřeby elektrické energie se lze domnívat, že započala nová energetická éra. Jejimi hlavními charakteristickými rysy jsou rostoucí ceny energií a silící požadavky na ochranu klimatu. Energetická účinnost v elektrotechnice je tedy stěžením otázkou nejbližší budoucnosti, přičemž kompenzace jalového výkonu může tvořit důležitou část jejího řešení a současně přispět také k ochraně klimatu.

Požadavky na stanovení účinníku $\cos \varphi$ v rozsahu 0,95 (indukční charakter) až 1 pro odběr elektrického proudu v průmyslu se budou v této souvislosti zvyšovat.

S touto diplomovou prací jsem se zdokonalil v řešení kompenzace jalového výkonu a také s filtrace harmonických. Byl jsem schopen řešit úvahu nad zadaným tématem. Tato diplomová práce může být taktéž použita jako učební pomůcka.

7 Seznam použité literatury

1. Santarius P., Gavlas J., Kužela M., Dán A.: Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí.
2. Daniel Mayer: Elektrodynamika v energetice. Nakladatelství BEN 2005
3. Hradílek, Z. :Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. VŠB-TU Ostrava, 2008
4. Pauza J.: Silnoproudá rozvodná zařízení v průmyslu. SNTL 1974
5. Horák K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL 1980
6. Technická dokumentace firmy NAVARIS (www.navaris.cz)
7. Technická dokumentace ZEZ SILKO
8. Technická dokumentace EMG Zlín
9. Projektování kompenzačních zařízení (www.emcos.cz)
10. Heřman, J. a kol. :Příručka silnoproudé elektrotechniky. SNTL, Praha, 1984
11. Hodinka M., Fecko Š., Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL 1989 Praha
12. Norný ČSN, firemní literatura, technická dokumentace BC MCHZ

8 Přílohy

Příloha č.1 Celkové schéma napájení BorsodChem

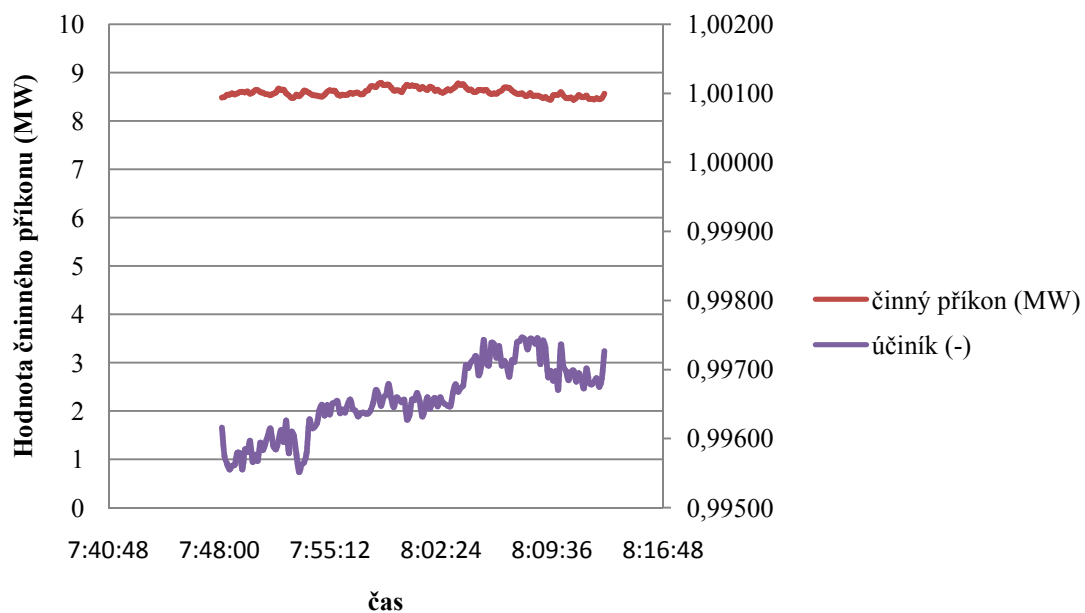
Příloha č.2 Instalované kompenzační rozváděče

Příloha č.3,4 Grafy naměřených hodnot při změnách odběrů synchronních strojů

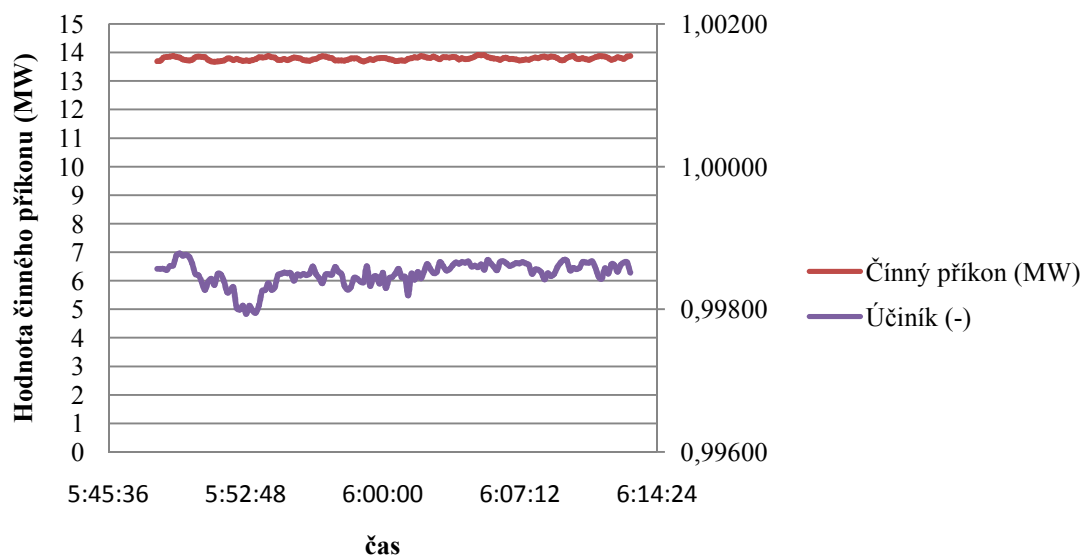
Příloha č.2

Rozvodna	Kompenzace	1.stupeň		2.stupeň		3.stupeň		Celkový výkon (kVAr)	Typ	Zapojení
		ks	kVAr	ks	kVAr	ks	kVAr			
DO 1	RK 12	24	20					480	suchý	D
	RK 13	24	20					480	suchý	D
	RK 14	1	25	6	12,5			100	suchý	D
										D
DO 2	RK 13.21	2	20	1	12,5			52,5	suchý	D
										D
DO 3	RK 35	32	8					256	olej	D
	RK 36	40	8					320	olej	D
	RK 37	32	8					256	olej	D
	RK 38	32	8					256	olej	D
										D
DO 4	RK 41	6	20	2	12,5			145	suchý	D
	RK 42	7	20	1	12,5			152,5	suchý	D
										D
DO 5	RK 51	13	25	2	20	8	12,5	465	suchý	D
	RK 52	15	25	1	20	3	12,5	432,5	suchý	D
										D
DO 6	RK 61	8	10					80	olej	D
	RK 62	8	10					80	olej	D
										D
DO 7	RK 73	24	10					240	olej	D
										D
DO 8	RK 81	2	25	8	20			210	suchý	D
	RK 82	2	25	8	20			210	suchý	D
										D
DO 11	RK 113	6	20					120	suchý	D
										D
AN	RK 115	12	25	10	20	1	12,5	512,5	suchý	D
	RK 116	12	25	10	20	1	12,5	512,5	suchý	D
										D
REC	RK 11.7	18	25	3	12,5			487,5	suchý	D
	RK 11.8	18	25	3	12,5			487,5	suchý	D
	RK 11.9	18	25	3	12,5			487,5	suchý	D
	RK 11.10	18	25	3	12,5			487,5	suchý	D
	RK 34	9	12,5					112,5	suchý	D
										D
KD 8	RC 11.14	14	50					700	suchý	D

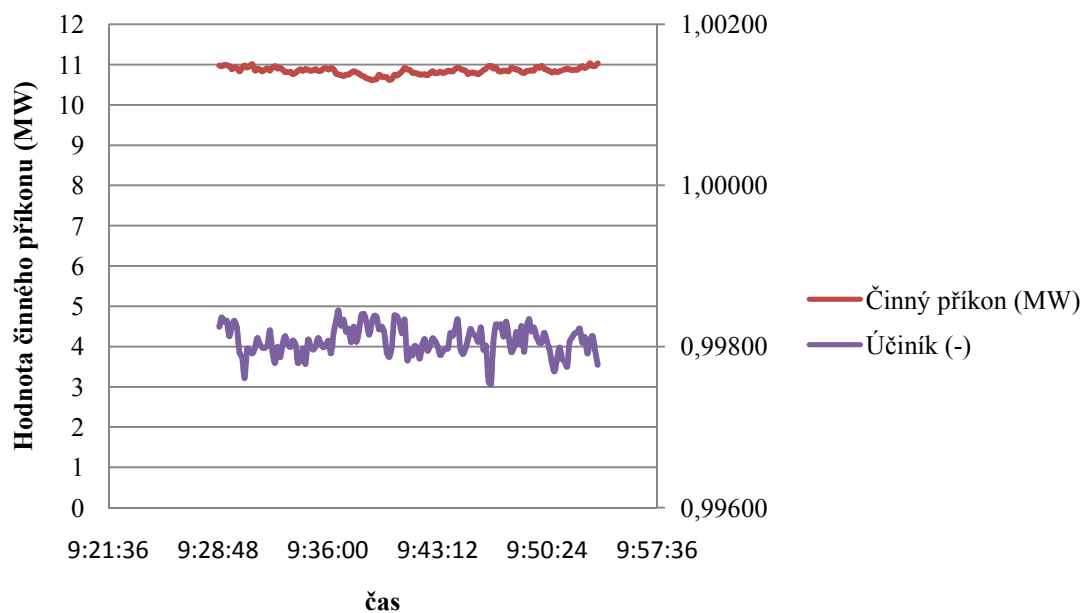
Měření při odstavení KD6 a KD7



Měření při plném zatížení všech synchronních strojů



Měření bez KD7



Odběr LDS při omezené výrobě (bez synchronních strojů)

